

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2009

Miloš Šikula

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Rezonance v napájecí soustavě 25 kV, 50 Hz
Resonance in Supply Network 25 kV, 50 Hz

2009

Miloš Šikula

Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě 7.5.2009

.....
Podpis

Poděkování

Děkuji za vedení práce a podmětné připomínky vedoucím práce Ing. Petru Krejčímu, Ph.D. Dále děkuji doc. Ing. Karlu Hlavovi, CSc. za přínosné konzultace.

Abstrakt

Práce se zabývá problematikou spojenou se vznikem vlastních rezonančních frekvencí trakční napájecí jednofázové soustavy 25 kV, 50 Hz. Popisuje vznik a důsledky harmonických složek v proudu odebíraném hnacím vozidlem s diodovým trakčním měničem a v souvislosti s tím poukazuje na nutnost použití filtračně-kompenzačního zařízení v rozvodnách ČD. Stanovuje postup výpočtu vlastních frekvencí trakční napájecí soustavy a experimentálně prověřuje jejich existenci na úseku zahraniční železnice.

Teoretická část se zabývá vznikem vlastních rezonančních frekvencí trakční napájecí soustavy, vlivem jednotlivých částí napájecí soustavy a její konfigurace na rezonanční frekvence. Dále přibližuje postup výpočtu pro stanovení rezonanční frekvence pro různé konfigurace trakční napájecí soustavy, včetně konfigurace soustavy s připojeným filtračně-kompenzačním zařízením. Teoretickou část uzavírá koncepce, provedení a popis funkce filtračně-kompenzačního zařízení ve vybrané trakční napájecí stanici Břeclav.

V praktické části je uveden výpočet pro stanovení rezonanční frekvence s odpojeným filtračně-kompenzačním zařízením pro různé délky jednostranně otevřeného trakčního vedení, dále stanovení rezonanční frekvence s připojeným filtračně-kompenzačním zařízením pro různé délky trakčního vedení. V poslední části jsou uvedeny diagramy závislosti vlastní rezonanční frekvence trakční napájecí soustavy na délce jednostranně napájeného (otevřeného) trakčního vedení.

Klíčová slova

Vlastní rezonanční frekvence, filtračně-kompenzační zařízení, hnací vozidlo s diodovým trakčním měničem, zdroj harmonických, trakční napájecí soustava, trakční vedení, budicí signál, schéma napájení „L“, schéma napájení „T“, stojatá vlna.

Abstract

This work deals with the problem of the formation of the rated resonance frequencies in the one phase alternating system 25 kV, 50 Hz. It describes the formation and the effect of the harmonic in the current demanded by a motor vehicle with diode tractive converter and in connection with this it shows the necessity of using a filtration balancing equipment in switching stations of ČD. It lays down the procedure of the calculation of rated resonance frequencies in the tractive feed array and experimentally checks their appearance on a haul of a foreign railway.

The theoretical part is interested in the formation of the rated resonance frequencies in one phase system, in the influence of each part of the feed array and in its configuration of the resonance frequency. Then it approaches the process of the calculation of rated resonance frequencies for different configurations of the tractive feed array, including the configuration of the array with a filtration compensatory equipment added. The theoretical part is closed with the conception, the construction and the description of the function of the filtration compensatory equipment in a chosen tractive feed array.

In the practical part, the calculation of the resonance frequency with the filtration compensatory equipment disconnected is shown for different lengths of the one-side-opened contact line. It also shows the calculation of the resonance frequency for different lengths of the contact line with the filtration compensatory equipment connected. In the last part there are diagrams showing the dependance of the rated resonance frequency of the tractive feed array on the length of the one-side-opened contact line.

Key words

Rated resonance frequency, filtration compensatory equipment, motor vehicle with diode tractive converter, source of harmonic, tractive feed array, contact line, actuating signal, power supply scheme „L“, power supply scheme „T“, standing wave.

Seznam použitých symbolů a zkratek

AC		střídavá soustava
$A_{P, TNS}$	[J]	činná práce odebraná trakční napájecí stanicí
ČD		České dráhy
DC		stejnoseměrná soustava
DFT		diskrétní Fourierova transformace
DPF		účinník základní harmonické
EHV		elektrické hnací vozidlo
EMC		elektromagnetická kompatibilita
FFT		rychlá Fourierova transformace
FKZ		filtračně-kompenzační zařízení
HDO		hromadné dálkové ovládání
I_1	[A]	proud 1. harmonické
I_h	[A]	proud h-té harmonické
MB		měřicí bod
MŘS		místní řídicí systém
P_{TNS}	[W]	činný výkon trakční napájecí stanice
PF		opravdový účinník
PTP		přístrojový transformátor proudu
Q_C	[VAr]	výkon kondenzátoru
Q_K	[VAr]	kapacitní výkon
TNS		trakční napájecí stanice
TT		trakční transformátor
TV		trakční vedení
VN		vysoké napětí
VVN		velmi vysoké napětí
VÚŽ		Výzkumný ústav železniční
ŽZO VÚŽ		Železniční zkušební okruh výzkumného ústavu železničního
$\cos \varphi$		účinník odběru bez kompenzačního zařízení
$\cos \varphi_1$		účinník základní harmonické
$\cos \varphi_K$		účinník požadovaný s použitím kompenzace
f_R		vlastní rezonanční frekvence
h		řád harmonické
k		koeficient kompenzace
k_P		stupeň kompenzace
n_R		reálná veličina
λ		opravdový účinník
μ		činitel základní harmonické

OBSAH

1. ÚVOD.....	3
2. PARAMETRY TRAKČNÍHO OBVODU PRO TÓNOVÉ FREKVENCE	4
2.1 Experimentální ověření frekvenční závislosti měrné indukčnosti trakčního vedení širé trati....	5
2.1.1 Trakční transformátor	5
2.1.2 Trakční vedení.....	6
2.2 Výpočet měrné kapacity trakčního vedení a odhad její frekvenční závislosti	8
3. VLASTNOSTI HNACÍCH VOZIDEL S DIODOVÝM TRAKČNÍM MĚNIČEM VŮČI NAPÁJECÍ SOUSTAVĚ.....	11
3.1 Náhradní schéma trakčního obvodu diodových hnacích vozidel.....	11
3.2 Spektrum proudu odebíraného z trolejového vedení.....	12
3.2.1 Přiblížení významu „opravdového“ účinníku (PF).....	13
3.2.2 Harmonická analýza.....	15
3.3 Průkaz o charakteru hnacího vozidla s diodovým trakčním měničem jako proudového zdroje harmonických.....	19
3.3.1 Rezonanční jevy v trakčním obvodu.....	19
3.3.2 Výpočet hodnot vlastních frekvencí trakční napájecí soustavy.....	21
3.3.3 Jeden trakční transformátor, jednokolejná trať, bez přírodního vedení	21
3.3.4 Experimentální ověření	24
3.3.5 Výsledky první série měření	26
3.3.6 Výsledky druhé série měření.....	28
3.3.7 Odezva trakční napájecí soustavy na budicí signál	30
3.3.8 Chování trakční napájecí soustavy na její vlastní frekvenci.....	32
4. KONFIGURACE FILTRAČNĚ KOMPENZAČNÍHO ZAŘÍZENÍ V TRAKČNÍ NAPÁJECÍ STANICI	35
4.1 Vznik jalového výkonu v trakční soustavě.....	35
4.2 Funkce filtračně kompenzačního zařízení (FKZ) v AC trakční napájecí stanici	37
4.3 Koncepce FKZ v trakčních napájecích stanicích	38
4.3.2 Ladění L-C rezonančních větví FKZ	39
4.3.3 Funkce dekompenzační větve FKZ.....	39
4.4 Technické řešení filtračně kompenzačního zařízení v trakční rozvodně 25 kV	40
4.4.1 Základní údaje.....	40
4.4.2 Výchozí údaje vybrané TNS Břeclav	40
4.4.3 Použité přístroje	41

5. STANOVENÍ VLASTNÍCH REZONANČNÍCH FREKVENCÍ NAPÁJECÍ SOUSTAVY JAKO CELKU	43
5.1 Odvození obecného výrazu pro výpočet vlastních rezonančních frekvencí	43
5.2 Stanovení rezonančních frekvencí s odpojeným FKZ pro zvolenou rozvinutou délku TV	44
5.3 Stanovení rezonančních frekvencí s připojeným FKZ pro zvolenou rozvinutou délku TV	46
5.3.2 Výrazy pro výpočet rezonanční frekvence dalších konfigurací napájecí soustavy	48
5.4 Diagram závislosti první vlastní rezonanční frekvence na rozvinuté délce jedné stopy trakčního vedení.....	50
6. ZÁVĚR.....	53
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	54

1. Úvod

Tato diplomová práce se zabývá problematikou spojenou se vznikem vlastních rezonančních frekvencí trakční napájecí soustavy 25 kV, 50 Hz. Popisuje vznik a důsledky harmonických složek v proudu odebíraném hnacím vozidlem s diodovým trakčním měničem a poukazuje na nutnost použití filtračně-kompenzačního zařízení v rozvodnách ČD. Stanovuje postup výpočtu vlastních frekvencí trakční napájecí soustavy a experimentálně prověřuje existenci těchto na úseku zahraniční železnice.

Střídavá elektrická hnací vozidla používaná na ČD jsou vybavena zastaralou koncepcí svého napájecího obvodu. Problémovým prvkem EHV je diodový trakční usměrňovač a regulace napětí trakčních motorů odbočkami na transformátoru. Chování takových AC hnacích vozidel vzhledem k trakční napájecí soustavě má zásadní význam pro časový průběh proudu odebíraného hnacím vozidlem. Tento proud je nesinusový a disponuje značným obsahem harmonických.

Vlivem prvků v trakční napájecí soustavě, jako je trakční vedení, trakční transformátor, síť dodavatele elektrické energie, dochází k rezonancím. Číselné hodnoty vlastních frekvencí závisí nejenom na parametrech prvků trakčního obvodu, ale i na jeho konfiguraci a geometrických délkách napájených úseků. Rezonance jsou z hlediska teoretické elektrotechniky důsledkem RLC obvodu, jenž představuje náhradní schéma trakční napájecí soustavy. Ta potom vytváří složitý elektrický obvod, který je za předpokladu vhodného buzení schopen kmitání.

Cílem diplomové práce je dokázat existenci vlastních frekvencí trakčního obvodu jako celku a stanovit hodnoty vlastních frekvencí pro konfiguraci sítě „L“ s jedním transformátorem pro různé geometrické délky trakčního vedení bez připojeného FKZ a s připojeným FKZ jednak se zanedbáním přívodního vedení 110 kV od dodavatele elektrické energie, jednak s respektováním tohoto vedení.

2. Parametry trakčního obvodu pro tónové frekvence [1]

Trakční obvod jednofázové soustavy je v principu složen mimo ohmické složky z indukčností a kapacit. Taková skladba elektrického obvodu, pokud jsou ohmické složky malé, vede k možnosti vzniku elektrických rezonancí, jejichž kmitočet závisí především na parametrech trakčního obvodu a dále na kmitočtu budícího elektrického rozruchu. Trakční obvod je složen z těchto složek: napájecí síť 110 kV, transformátor trakční napájecí soustavy, trakční vedení (trolejové vedení, zpětné vedení kolejnicemi a zemí).

Proud odebíraný hnacím vozidlem je deformován podle známých zákonů komutace jednofázového dvoucestného usměrňovače a spektrum jeho harmonických je známé. Tyto deformace jsou v prvním přiblížení prakticky nezávislé na tvaru napájecího napětí, pokud zkrácení tvaru napětí nepřestoupí určitou mezní hodnotu, které však v praxi obvykle není dosaženo.

Z toho vyplývá, že jednofázové hnací vozidlo můžeme považovat za proudový zdroj harmonických o známém složení.

S jistou přibližností lze trakční vedení považovat za elektricky dlouhé, homogenní, tedy s rozprostřenými elektrickými parametry. Tato přibližnost je dána poměrem délky traťových mezistaničních úseků k délkám železničních stanic. Rozbor ukazuje, že délku stanic lze obvykle zanedbat vzhledem k délce mezistaničních úseků. Totéž platí i pro napájecí vedení 110 kV.

Dalším zjednodušením je zanedbání svodu trolejového vedení a s ním spojených dalších vzdušných vedení vůči zpětnému vedení. Tato možnost je dána vlastnostmi dnes používaných dřívkových izolátorů a vyloučením možnosti jejich povrchového znečištění zánikem parní trakce. Jejich svodový odpor proto dosahuje velmi vysokých hodnot a umožňuje uvedené zjednodušení.

Podélnou složku odporu trakčního vedení můžeme u AC soustavy také zanedbat, avšak pouze při výpočtech týkajících se rezonančních frekvencí. Jistou roli zde hraje i opotřebení trolejového drátu snižující jeho vodivý průřez a zvyšující tedy jeho měrný odpor. Při výpočtech sledujících nastavení ochran trakčního vedení se předpokládá opotřebení na 90 % jmenovitého vodivého průřezu trolejového drátu.

Parametry trakčního vedení nejvýznamněji ovlivňují dvě měrné veličiny:

- měrná kapacita trakčního vedení C_{TV} ,
- měrná indukčnost trakčního vedení L_{TV} .

2.1 Experimentální ověření frekvenční závislosti měrné indukčnosti trakčního vedení širé trati [1], [3], [6]

2.1.1 Trakční transformátor

Pro napájení jednofázové soustavy 25 kV, 50 Hz je na ČD používán jednotný trakční transformátor 110/27 kV v jednofázovém provedení, jehož primární vinutí je připojeno na jedno ze sdružených napětí sítě 110 kV dodavatele elektrické energie.

Z hlediska EMC lze tento transformátor nahradit podélnou indukčností danou jeho napětím nakrátko. Vzhledem k širokému rozsahu regulace výstupního napětí umožněné pod výkonem přepínačem primárních odboček (2 x 8 odboček) závisí hodnota náhradní podélné indukčnosti na použité odbočce.

Pro další rozbor je závažná otázka náhradního schématu výkonového transformátoru pro oblast energetických harmonických. V případě úplného náhradního schématu jednofázového trakčního transformátoru je nutno uvažovat se všemi kapacitami (primární vinutí – sekundární vinutí, primární vinutí – nádoba transformátoru a magnetické jádro, sekundární vinutí – nádoba transformátoru a magnetické jádro), dále s příčnou magnetizační větví a také je třeba počítat s primárním a sekundárním rozptylem včetně ohmických složek.

Pro další výpočty lze náhradní schéma jednofázového trakčního transformátoru značně zjednodušit. Byly provedeny podrobné teoretické i experimentální práce, které potvrdily, že kapacita mezi primárním a sekundárním vinutím ani kapacity vinutí proti kostře transformátoru, případně příčná větev magnetizační, se ve sledovaném kmitočtovém oboru neuplatní. Z tohoto zjednodušení pak vyplývá, že proudové harmonické procházejí trakčním transformátorem ovlivněné pouze jeho použitým závitovým převodem a nejsou ani tlumeny, ani rezonančně zesíleny funkcí tohoto transformátoru.

Pracoviště Ústavu elektrotechniky Akademie ČR potvrdilo na základě geometrického uspořádání obou vinutí vůči jádru transformátoru, že uvedený předpoklad je platný pro frekvenční oblast přibližně do 16 kHz. Experimentálně byla správnost uvedeného předpokladu prokázána současnou harmonickou analýzou oscilogramu téže periody deformovaného časového průběhu proudu primárního a sekundárního vinutí, kde výsledné porovnání získaných spekter ukázalo dobrou shodu obsahu jednotlivých harmonických do řádu přibližně 40, tj. asi do 2 kHz.

Výraz pro výpočet náhradní indukčnosti trakčního transformátoru L_{TT} v hodnotě přepočtené na jeho sekundární stranu má tvar:

$$L_{TT} = \frac{U_{TT}^2 \cdot u_K}{100 \cdot \pi \cdot p^2 \cdot S_{TT} \cdot 100}, \quad (2.1)$$

kde U_{TT} je napětí primárního vinutí [lze vzít $U_{TT} = 110$ kV]

u_K	je napětí nakrátko transformátoru	[lze vzít $u_K = 9,55 \%$]
p	je závitový převod transformátoru	[lze vzít $p = 4,0$]
S_{TT}	je jmenovitý výkon transformátoru	[lze vzít $S_{TT} = 10 \text{ MVA}$]

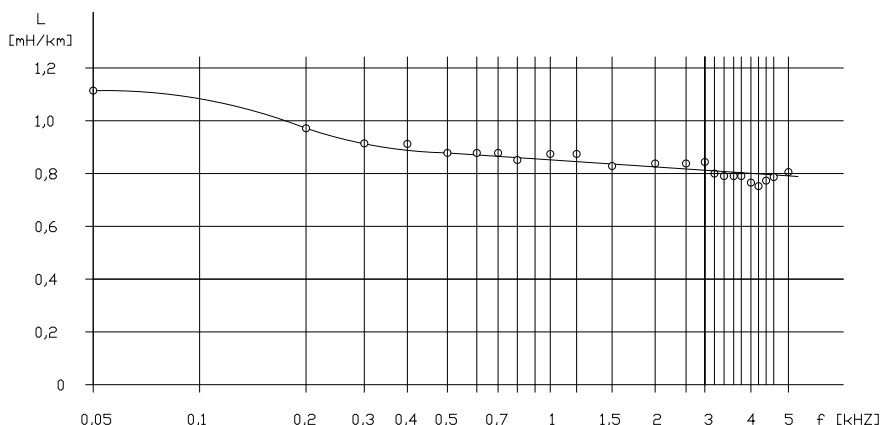
Dosažením uvedených hodnot dostaneme $L_{TT} = 23 \text{ mH}$.

2.1.2 Trakční vedení

Trakční vedení budeme považovat za jeden společný závit složený z různých prvků. Stejně jako přívodní vedení od dodavatele elektrické energie také trakční vedení lze s jistou přibližností považovat za vedení elektricky dlouhé, homogenní, tedy s rozprostřenými elektrickými parametry. Tato přibližnost je dána poměrem délky traťových mezistaničních úseků k délkám železničních stanic. Rozbor ukazuje, že délku stanic lze obvykle zanedbat vzhledem k délce mezistaničních úseků.

Frekvenční závislost měrné indukčnosti smyčky trakčního vedení je poměrně složitý problém. Je možné konstatovat, že vnitřní indukčnost jednotlivých vodičů trakčního vedení nesoucích trakční napětí lze zanedbat. Podstatný je však vliv zpětného vedení tvořeného trakčními kolejnicemi a paralelně k nim zemní cestou. Trakční kolejnice, jakožto masivní ocelový vodič s velkým průřezem, vykazuje s kmitočtem rostoucí odpor daný povrchovým jevem (skinefektem).

Experimentálně bylo ověřeno, že několik set metrů za elektrickým hnacím vozidlem AC soustavy jsou již proudové složky vyšších kmitočtů procházející kolejnicemi podstatně zmenšeny a vracejí se do napájecí stanice převážně zemní cestou. Zde se uplatní pojem „hloubky vniku“, tedy hloubky fiktivní cesty střídavé složky zpětného proudu zemí. Protože však zemní podloží tratě obvykle není homogenní, jsme zde odkázáni na poznatek, že tato hloubka vniku klesá s rostoucí frekvencí. Klesá-li však hloubka vniku, pak zákonitě musí klesat s frekvencí i plocha smyčky trakčního vedení a tedy i její měrná indukčnost L_{TV} . Graficky je tato skutečnost znázorněna na *obr.2.1*.

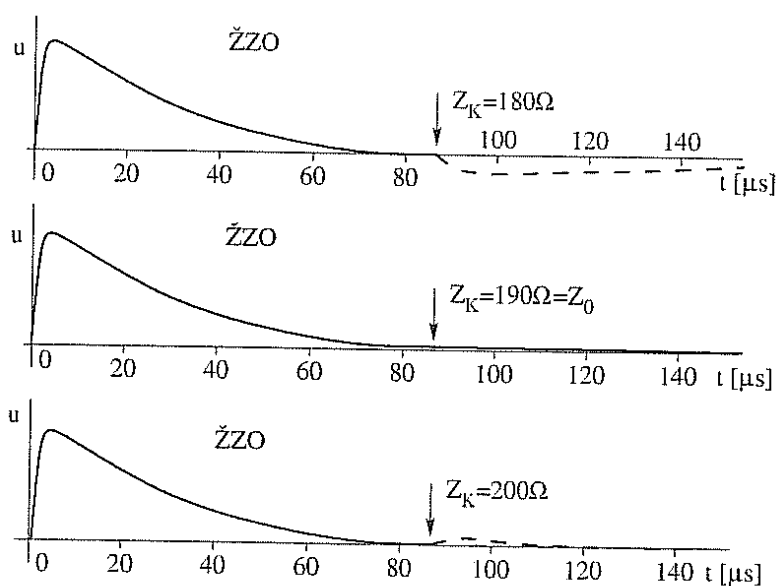


Obr.2.1 Frekvenční závislost měrné indukčnosti trakčního obvodu

Zde je uvedena závislost měrné indukčnosti trakčního obvodu sejmutá na Železničním zkušebním okruhu VÚŽ s délkou trakčního vedení 13,2 km Ohmovou metodou při napájení trakčního vedení z výkonového tónového generátoru. Trakční vedení zde tehdy bylo tvořeno trolejovým drátem $150 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$, nosným lanem $210 \text{ mm}^2 \text{ AlFe}$ a zesilovacím lanem $150 \text{ mm}^2 \text{ AlFe}$. Měrná kapacita této konfigurace pro 50 Hz byla změřena $C_{TV} = 21,3 \text{ nF/km}$. Měrná indukčnost pro 50 Hz vychází $L_{TV,50} = 1,14 \text{ mH/km}$, pro 5 kHz pak nižší hodnota $L_{TV,5\text{kHz}} = 0,8 \text{ mH/km}$.

Pro vyjasnění, zda zjištěný pokles hodnot měrné indukčnosti trakčního vedení pokračuje i za mez kmitočtu 5 kHz použitého pro měření na ŽZO VÚŽ s použitím výkonového tónového generátoru, byla použita metoda experimentálního vyšetření číselné hodnoty vlnového odporu trakčního vedení $Z_{TV,V}$.

Tato metoda použila rázový generátor poskytující kusou rázovou vlnu cca $1/20 \mu\text{s}$. Oscilograficky byla snímána vyslaná rázová vlna a její odraz od konce trakčního vedení, kde byl mezi trolejové vedení a kolejnici vložen bezindukční rezistor s hodnotami odporu 180, 190 a 200Ω . Získané oscilogramy jsou překresleny na obr.2.2.



Obr.2.2 Šíření rázové vlny v trakčním obvodu

Obr.2.2 ukazuje tři stavy v chování rázové vlny. První oscilogram platí pro hodnotu ukončovacího rezistoru 180Ω , kdy došlo k odrazu rázové vlny s opačnou polaritou (rezistor byl tedy menší než vlnový odpor). Prostřední oscilogram pak odpovídá stavu, kdy bylo trakční vedení „přizpůsobeno“, tedy ukončeno svým vlnovým odporem v hodnotě 190Ω . Poslední oscilogram ukazuje stav při použití ukončovacího rezistoru s odporem 200Ω , kdy došlo k odrazu rázové vlny se stejnou polaritou (rezistor byl tedy větší než vlnový odpor).

Vezmeme-li údaje pro nejvyšší měřený kmitočet 5 kHz, pak platí podle *obr.2.1* pro měrnou indukčnost $L_{TV} = 0,8 \text{ mH/km}$, pro měrnou kapacitu $C_{TV} = 21,3 \text{ nF/km}$. Tyto hodnoty dávají pro vlnový odpor $Z_{TV,V}$ hodnotu 194Ω , což je v souladu s hodnotou naměřenou metodou rázové vlny. Protože však rázová vlna s ohledem na svůj průběh v oblasti mikrosekund náleží spíše do oblasti MHz, lze konstatovat, že hodnota měrné indukčnosti zjištěné pro 5 kHz již dále pro vyšší kmitočty neklesá. Pro měrné hodnoty příslušející kmitočtu 50 Hz dostaneme stejným postupem vlnový odpor $231,4 \Omega$.

$$Z_{TV,V} \cong \sqrt{\frac{L_{TV}}{C_{TV}}} = \sqrt{\frac{0,8 \cdot 10^{-3}}{21,3 \cdot 10^{-9}}} = 193,8 \Omega \quad (2.2)$$

2.2 Výpočet měrné kapacity trakčního vedení a odhad její frekvenční závislosti

Kapacita TV proti zemi je tvořena na jedné straně vodiči trolejového vedení, na druhé straně povrchem země a kolejnic. Vzhledem ke geometrické poloze kolejnic vůči zemi lze kolejnice jako elektrodu zanedbat vůči výšce trolejového vedení.

Z toho vyplývá, že kapacita trolejového vedení je tvořena vzdušnými vodiči a povrchem země jako ekvipotenciální plochou. Z této úvahy pak lze vyvodit závěr, že měrná kapacita trolejového vedení není frekvenčně závislá.

Tento poznatek byl potvrzen měřením měrných parametrů TV na Železničním zkušebním okruhu VÚŽ 091, kdy byla zjištěna měrná kapacita TV konstruované průřezově pro soustavu 3 kV DC a izolačně pro soustavu 25 kV, 50 Hz AC (trolejový drát 150 mm^2 , nosné lano 210 mm^2 a zesilovací lano 150 mm^2) hodnotou $21,3 \text{ nF/km}$.

Pro výpočet měrné kapacity trakčního vedení se vychází z dvojice vodivě propojených vodičů volně zavěšených proti zemi.

Vstupní veličiny a jejich odhad číselných hodnot platné pro trakční vedení ČD jsou:

- výška trolejového drátu: $h_1 \cong 5,6 \text{ m} \cong b$,
- výška nosného lana nad zemí: $h_2 \cong 6,6 \text{ m}$,
- poloměr trolejového drátu: $r_1 \cong 0,0005 \text{ m}$,
- poloměr nosného lana: $r_2 \cong 0,005 \text{ m}$,
- výška sestavy trakčního vedení: $a \cong 1 \text{ m}$,

• permitivita vakua:

$$\varepsilon_0 = 8,855 \cdot 10^{-12} \text{ F/m.}$$

Pro měrnou kapacitu trolejového drátu se uvádí výraz:

$$\frac{C_{TD}}{l} = 2\pi\varepsilon_0 \cdot \frac{\ln \frac{2h_2}{r_2} - \ln \frac{b}{a}}{\ln \frac{2h_1}{r_1} \cdot \ln \frac{2h_2}{r_2} - \ln^2 \frac{b}{a}}. \quad (2.3)$$

Pro měrnou kapacitu nosného lana se uvádí výraz:

$$\frac{C_{NL}}{l} = 2\pi\varepsilon_0 \cdot \frac{\ln \frac{2h_1}{r_1} - \ln \frac{b}{a}}{\ln \frac{2h_1}{r_1} \cdot \ln \frac{2h_2}{r_2} - \ln^2 \frac{b}{a}}. \quad (2.4)$$

Po dosazení výše uvedených odhadnutých číselných hodnot dostaneme:

$$C_{TD} \cong 5,925 \text{ nF/km,}$$

$$C_{NL} \cong 5,766 \text{ nF/km.}$$

Pak celková kapacita trolejového drátu a nosného lana proti zemi je:

$$C_{TD} + C_{NL} \cong 11,691 \text{ nF/km.}$$

Dále je nutno připočítat alespoň odhadnutou kapacitu věšáků, tzv. laníček, proti zemi. Budeme předpokládat vzájemnou vzdálenost jednotlivých věšáků 6 m, na 1000 m tedy připadne cca 167 věšáků. Střední výšku věšáků nad zemí určíme $(5,6+6,6)/2 = 6,1 \text{ m} = h$. Poloměr věšákového vodiče předpokládáme $0,005 \text{ m} = r$ a jeho délku $1 \text{ m} = l$.

Pak lze použít pro výpočet kapacity jednoho věšáku v předpokládané vodorovné poloze proti zemi výraz:

$$\frac{C_V}{l} = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln \frac{2h}{r}}. \quad (2.5)$$

Po dosazení dostaneme odhadnutou kapacitu jednoho věšáku proti zemi:

$$C_V \cong 7,133 \text{ pF.}$$

Pro předpokládaný počet věšáků 167 na 1 km získáme kapacitu:

$$C_{V,167} \cong 1,191 \text{ nF/km.}$$

Celková kapacita trolejového vedení (trolejového drátu, nosného lana a věšáků) pak je dána součtem:

$$C_{TV} \cong 5,925 + 5,766 + 1,191 = 12,882 \text{ nF/km.}$$

Přes uvedená zjednodušení a odhady vstupních parametrů tato číselná hodnota odpovídá střední hodnotě změřené, totiž hodnotě 15 nF/km.

Za předpokladu, že případné zesilovací vedení používané na soustavě 3 kV DC má stejné geometrické vlastnosti, bylo by možno kapacitu takového TV vůči zemi odhadnout hodnotou $12,882 + 5,766 = 18,648 \text{ nF/km}$. I tato hodnota odpovídá naměřené střední hodnotě 20 nF/km.

3. Vlastnosti hnacích vozidel s diodovým trakčním měničem vůči napájecí soustavě [5], [10]

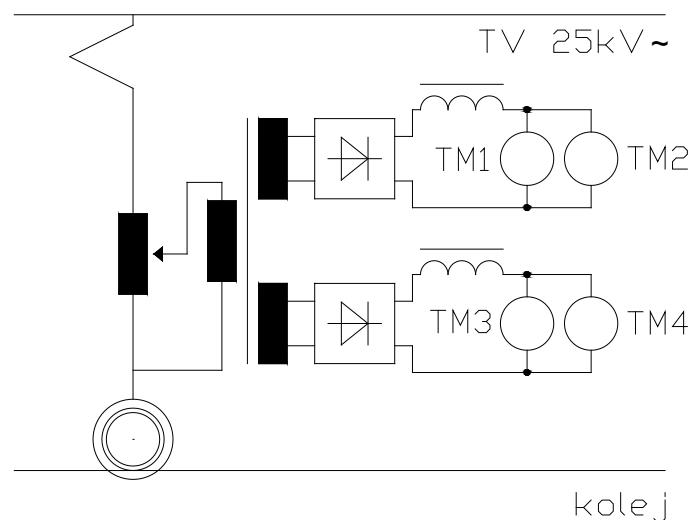
Diodový trakční měnič je elektrické zařízení, nezbytné pro provoz na střídavých lokomotivách se stejnosměrnými motory, určené k usměrnění napětí z transformátoru. Trakční usměrňovač je tedy řazen za transformátorem. Trakční usměrňovače byly původně rtuťové, dnes se používají výhradně polovodičové – křemíkové.

Rtuťový neboli ignitronový usměrňovač je zastaralou konstrukcí, která se dnes v podstatě již nepoužívá. Důvodem je mohutnost a složitost tohoto zařízení. Základem rtuťového usměrňovače je ignitron - rtuťový ventil. Jedná se o usměrňovací výbojku v kovové baňce se rtuťovými parami a zapalovací elektrodou, tzv. ignitrem. Hodnota napětí na výstupu z ignitronu se reguluje posouváním fáze zapalovacího impulsu. Rtuťový usměrňovač byl z výroby na zkušební lokomotivě S 479.101 z roku 1962.

Praktičtější a modernější konstrukcí jsou usměrňovače založené na vlastnostech polovodičů. Obvykle se používají usměrňovače sestavené z diod, nejčastěji křemíkových. Zde se využívá diodového jevu. Zjednodušeně můžeme říci, že se dioda v praxi chová jako ventil, propouštějící proud pouze v jednom (propustném) směru. Využita je ovšem pouze kladná půlperioda, což není příliš praktické. V technické praxi se proto používají tzv. dvoucestné můstkové usměrňovače, na jejichž výstupu je pulzující napětí, které se vyhlazuje pomocí filtrů s tlumivkami. Vyhlazení ale není dokonalé, vzniká zvlněný proud. Trakční motory určené pro napájení zvlněným proudem mají poněkud odlišnou konstrukci, než mají klasické stejnosměrné elektromotory na stejnosměrných lokomotivách.

3.1 Náhradní schéma trakčního obvodu diodových hnacích vozidel [1], [5]

Hnací vozidla pro AC soustavu, jak jsou provozována na ČD, požívají až na malé výjimky pro regulaci trakčního výkonu odbočkovou regulaci, neřízený diodový usměrňovač a sériové stejnosměrné trakční motory zapojené paralelně. Orientační schéma trakčního obvodu je na *obr.3.1.*



Obr.3.1 Orientační náhradní schéma hnacích vozidel AC soustavy

Trakční napětí přichází na primární vinutí vozidlového transformátoru, který má 32 odboček přepínatelných pod výkonem. Z navolené odbočky se dílčí napětí přivádí na primární vinutí dalšího transformátoru s dvojicí sekundárních vinutí. Na každém sekundárním vinutí je připojen diodový můstkový usměrňovač, jehož výstupní napětí přichází přes vyhlazovací tlumivku na dvojici paralelně připojených stejnosměrných sériových trakčních motorů téhož podvozku.

Z hlediska trakční napájecí soustavy je podstatné, že toto schéma snižuje nevýhodně účinník odebíraného trakčního výkonu a navíc značně deformuje časový průběh proudu odebíraného hnacím vozidlem z trakční napájecí soustavy.

Hnací vozidla moderní koncepce trakčního obvodu jsou vybavena čtyřkvadrantovým vstupním trakčním měničem, odstraňujícím obě uvedené nevýhody. Prvními vozidly tohoto typu na ČD jsou vozidla 680 (tzv. „pendolina“).

3.2 Spektrum proudu odebíraného z trolejového vedení [1]

Dnes provozovaná hnací vozidla této soustavy s diodovými trakčními měniči vykazují na sběrači úplné spektrum proudových harmonických lichých řádů počínaje řádem $n=3$ (150 Hz). Měřením bylo prokázáno, že obsahy těchto proudových harmonických dosahují v dlouhodobém průměru přibližně následující procentní hodnoty:

- 3. harmonická (150 Hz) má hodnotu cca 25 % základní harmonické 50 Hz,
- 5. harmonická (250 Hz) má hodnotu cca 10 % základní harmonické 50 Hz,

- 7. harmonická (350 Hz) má hodnotu cca 5 % základní harmonické 50 Hz.

Důsledkem vzniku uvedených harmonických složek v proudu odebíraném hnacím vozidlem "diodového" charakteru je:

- deformace časového průběhu napětí v trolejovém vedení,
- nutnost použití v trakčních napájecích stanicích filtračně-kompenzační zařízení (FKZ), které by podstatně omezilo průnik uvedených harmonických složek přes trakční transformátor trakční napájecí stanice do sítě 110 kV. Zde by došlo ke zkreslení napětí této sítě, což by bylo ze strany dodavatele elektrické energie nepřijatelné,
- další snížení hodnoty účinníku odebíraného výkonu. Uplatní se zde totiž tzv. "opravdový" účinník PF („*Power Factor*“, λ) definovaný výrazem:

$$PF = \mu \cdot DPF, \quad (3.1)$$

kde μ značí tzv. činitel tvaru proudu definovaný výrazem:

$$\mu = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}{I_1^2}}, \quad (3.2)$$

kde I_h jsou jednotlivé harmonické složky proudu řádu $2 \leq h \leq 40$,
 I_1 je efektivní hodnota základní harmonické proudu.

3.2.1 Přiblížení významu „opravdového“ účinníku (PF) [2]

Zdánlivý výkon, zavedený jako pomocná veličina z výpočtových důvodů, je obdobně jako u harmonických napětí a proudů definován jako součin efektivních hodnot napětí a proudů.

$$S = U \cdot I = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{l=0}^{\infty} I_l^2}. \quad (3.3)$$

Jalový výkon udává míru energie, která střídavě kmitá mezi zdrojem a spotřebičem:

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} Q_h = \sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h \sin \varphi_h. \quad (3.4)$$

Protože u neharmonických průběhů dochází k nerovnosti:

$$S^2 \geq P^2 + Q^2, \quad (3.5)$$

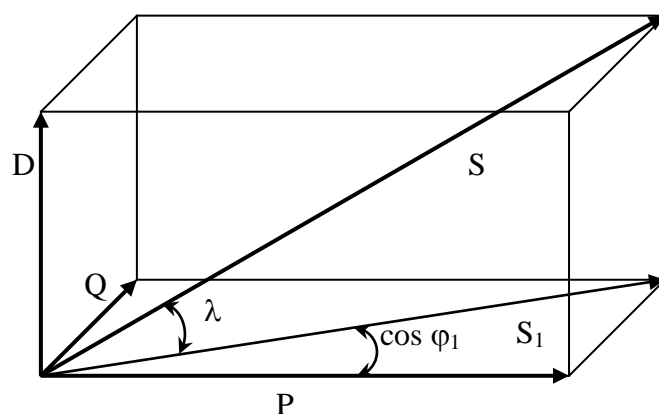
zavádí se pojem deformační výkon, který je definovaný jako:

$$D = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)}. \quad (3.6)$$

Deformační výkon, obdobně jako výkon jalový, představuje neúčinnou složku zdánlivého výkonu, vyvolávajícího nárůst ztrát v napájecí síti a snížení využitelnosti sítě. V neharmonických obvodech pak nestačí uvádět pouze účinník $\cos \varphi_1$, nýbrž je zaveden tzv. opravdový (celkový, někdy též skutečný) účinník λ . Velmi často přejímaný název je faktor výkonu (*Power Factor*), a označuje se buď písmenem λ , nebo *PF*.

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}}. \quad (3.7)$$

Není možné λ a $\cos \varphi_1$ zaměňovat, neboť dochází k velmi rozdílným hodnotám obou účinníků. Může docházet k takovým stavům, že požadujeme regulaci soustavy na $\cos \varphi_1 \rightarrow 1$, ale celkový účinník λ zůstává velmi nízký.



Obr.3.2 Diagram složek výkonů

3.2.2 Harmonická analýza [2], [8]

V teorii i v praxi se setkáváme s takovými průběhy elektrických veličin, které jsou sice periodické, ale jejich průběh je neharmonický. Protože se však velmi dobře a výhodně pracuje s harmonickými průběhy, je často požadováno vyjádřit periodickou veličinu jako nekonečnou řadu složenou z konstanty a harmonických veličin o kmitočtech rovných přirozeným násobkům základního kmitočtu. Tento rozklad se nazývá harmonická analýza. Vzniklá řada se nazývá Fourierova řada.

a) základní vlastnosti Fourierovy řady

Funkci $f(t)$ budeme nazývat periodickou, pokud pro všechna t platí:

$$f(t+T) = f(t). \quad (3.1)$$

Funkce $f(t)$ musí splňovat tzv. Dirichletovy podmínky, tj. funkce musí být v intervalu $\langle 0; T \rangle$ jednoznačná, konečná, po částech spojitá a musí mít konečný počet maxim a minim. Fourierova řada periodické funkce $f(t)$ s úhlovým kmitočtem ω má tvar:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cos(h\omega t) + b_h \sin(h\omega t)], \quad (3.2)$$

kde h je řád harmonické.

Fourierovy koeficienty jsou:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt, \quad (3.3)$$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(h\omega t) dt, \quad (3.4)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(h\omega t) dt. \quad (3.5)$$

Často je v praxi používán tzv. spektrální tvar Fourierovy řady ve tvaru:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\omega} D_h \sin(h\omega t + \varphi_h), \quad (3.6)$$

$$D_h = \sqrt{(a_h^2 + b_h^2)},$$

$$\varphi_h = \arctan \frac{b_h}{a_h}. \quad (3.7)$$

Posloupnost amplitud D_h jednotlivých harmonických složek dané periodické funkce $f(t)$ se nazývá *amplitudové spektrum*. Podobně posloupnost počátečních fází φ_h se nazývá *fázové spektrum* periodické funkce $f(t)$.

b) komplexní tvar Fourierovy řady, Fourierova transformace

Fourierovu řadu lze upravit na komplexní tvar:

$$f(t) = \sum_{h=-\infty}^{+\infty} c_h e^{jh\omega t}, \quad (3.8)$$

kde platí že:

$$c_h(jh\omega t) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{-jh\omega t} dt. \quad (3.9)$$

Frekvenční spektrum časového průběhu získáme tzv. spektrální analýzou. Základem tohoto rozkladu je *Fourierova (přímá) transformace*,

$$F(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j2\pi ft} dt. \quad (3.10)$$

Zpětná Fourierova transformace je definována:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(f) e^{j2\pi ft} df. \quad (3.11)$$

Kromě komplexního tvaru můžeme použít při praktických výpočtech též vztahy pro jednotlivé složky:

$$\operatorname{Re}\{F(f)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cos 2\pi f t dt, \quad (3.12)$$

$$\operatorname{Im}\{F(f)\} = - \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \sin 2\pi f t dt. \quad (3.13)$$

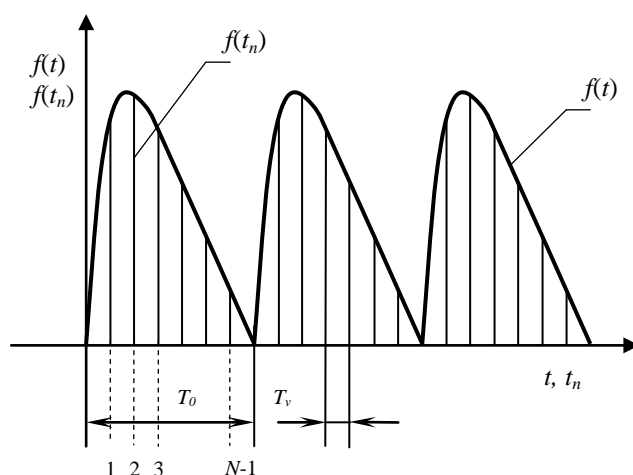
V případě, že budeme chtít zjistit frekvenční spektrum u průběhu, který získáme vzorkováním měřeného signálu s konstantní vzorkovací periodou T_v , je třeba použít algoritmy pro *diskrétní Fourierovu transformaci (DFT)*. Jedná se o to, transformovat posloupnost diskretních hodnot $\{f(t_n)\}$, kde $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ do kmitočtové oblasti. Význam vzorkování kmitočtu a převod spojitého průběhu na diskretní periodický signál je na *obr.3.3*.

Algoritmus pro přímou diskretní Fourierovu transformaci (*DFT*) je definován jako:

$$F(f_h) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(t_n) e^{-jn \frac{2\pi}{N} h} = DFT\{f(t_n)\} \\ n = 0, 1, 2, \dots, N - 1. \quad (3.14)$$

Pro transformaci z kmitočtové oblasti do časové je naopak nutné použít zpětné (inverzní) diskretní Fourierovy transformace (*DFT⁻¹*):

$$f(t_n) = \sum_{h=0}^{N-1} F(f_h) e^{jn \frac{2\pi}{N} h} = DFT^{-1}\{F(f_h)\}, \\ h = 0, 1, 2, \dots, N - 1. \quad (3.15)$$



$f(t)$ – spojitý průběh, $f(t_n)$ – diskrétní průběh
 T_v – perioda vzorkování, T_0 – perioda signálu $f(t)$, t – čas, t_n – čas pro diskrétní průběh

Obr.3.3 Časový průběh periodického signálu a odpovídající diskrétní signál

Zavedeme-li $W = e^{-j2\pi/N}$, můžeme obě rovnice přepsat do tvarů:

$$F(f_h) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(t_n) W^{hn}, \quad (3.16)$$

$$f(t_n) = \sum_{h=0}^{N-1} F(f_h) W^{-hn}. \quad (3.17)$$

Při řešení opět použijeme předpis:

$$e^{\frac{-j2\pi hn}{N}} = \cos\left(\frac{2\pi hn}{N}\right) + j \sin\left(\frac{2\pi hn}{N}\right), \quad (3.18)$$

kterým rozdělíme výpočet na reálnou a imaginární část.

Při výpočtu *DFT* je počet násobení úměrný N^2 . Pro velký počet N pak doba výpočtu může být (i při výkonných počítačích) velmi dlouhá. Z tohoto důvodu se používá tzv. *rychlá Fourierova transformace (FFT)*. Princip spočívá v tom, že existuje podobnost mnoha prvků v matici W^{hn} . Pro výpočet pak potřebujeme pouze $(N/2) \cdot \log_2 N$ násobení. Například pro $N = 2048 = 2^{11}$ bodů se potom doba výpočtu zkrátí přibližně 372 krát.

3.3 Průkaz o charakteru hnacího vozidla s diodovým trakčním měničem jako proudového zdroje harmonických [1]

3.3.1 Rezonanční jevy v trakčním obvodu

Trakční obvod zahrnuje tyto hlavní prvky:

a) přívodní vedení od dodavatele elektrické energie, u kterého předpokládáme vlastnosti homogenního „elektricky dlouhého“ vedení, napájeného napětím se základní frekvencí 50 Hz z bodu s tak velkým zkratovým výkonem pro 50 Hz, že v něm můžeme očekávat zkrat pro frekvenční složky harmonických. Jedná se tedy o vedení jednostranně zkratované,

b) trakční napájecí stanici (TNS), kde budou předmětem zájmu pouze vlastnosti trakční napájecí stanice AC soustavy.

TNS AC soustavy lze z hlediska EMC charakterizovat takto:

- TNS AC soustavy je v podstatě tvořena výkonovým trakčním transformátorem, dovolujícím průchod výkonu oběma směry,
- tento transformátor lze pro další analýzu nahradit podélnou indukčností danou jeho rozptylem a doplnit pro některé případy v sérii rezistorem představujícím činné ztráty (ve vinutí i v jádře),
- c) Trakční vedení** opět předpokládáme s vlastnostmi homogenního „elektricky dlouhého“ vedení.
- trakční vedení AC soustavy je v podmínkách ČD napájeno zásadně jednostranně, aby se zamezilo průchodu vyrovnávacího výkonu, který by protékal trakčním vedením v případě, že by napětí v obou sousedních TNS nebyla amplitudově či fázově přesně shodná. Jedná se tedy o vedení jednostranně otevřené,

d) Elektrické hnací vozidlo.

Hnací vozidlo AC soustavy lze z hlediska EMC charakterizovat takto:

- hnací vozidla AC soustavy s diodovým trakčním měničem se vůči napájecí soustavě chovají jako generátory proudových harmonických, jejichž spektrum v trakčně ustáleném stavu obsahuje složky všech lichých harmonických, a to jak sinové, tak kosinové členy, bez stejnosměrné složky. Průměrný účinník DPF leží hluboko pod požadovanou neutrální hodnotou.

V uvedeném přehledu hlavních prvků trakčního obvodu vystupují prvky:

- pasivní, ke kterým lze přiřadit:
 - přívodní vedení od dodavatele elektrické energie,
 - trakční napájecí stanici,
 - trakční vedení.
- aktivní, ke kterým lze přiřadit:
 - elektrická hnací vozidla.

V prvním přiblížení lze konstatovat, že vyjmenované tři pasivní prvky jsou převážně složeny z indukčností a kapacit, ať již ve tvaru:

- elektricky dlouhého vedení s rozprostřenými parametry, což se týká jak přívodního vedení od dodavatele elektrické energie, tak i trakčního vedení,
- soustředěném, představovaném náhradní indukčností trakčního transformátoru trakční napájecí stanice, případně včetně jiných přídatných prvků (FKZ).

Z teorie obvodů s L a C prvky vyplývá, že taková soustava vykazuje jisté vlastní frekvence, jejichž hodnota je závislá na:

- konfiguraci obvodu s těmito prvky,
- číselných hodnotách uvedených L a C prvků.

Nutno zdůraznit, že hodnoty těchto vlastních frekvencí nejsou nijak vázány například na základní kmitočet sítě 50 Hz, či na jeho násobky. Tyto frekvence budeme dále značit jako f_R a vyjadřovat pomocí reálné veličiny n_R definované výrazem (3.19):

$$n_R = \frac{f_R}{50}. \quad (3.19)$$

Podobně v prvním přiblížení lze konstatovat, že uvedený aktivní prvek, kterým je elektrické hnací vozidlo AC soustavy, působí vzhledem ke třem pasivním prvkům jako:

- spotřebič činné energie na kmitočtu sítě 50 Hz,
- proudový zdroj harmonických složek, jejichž kmitočet je v trakčně ustáleném a bezporuchovém stavu vždy roven pouze lichému násobku základního kmitočtu sítě 50 Hz, ať se již jedná o vozidla s diodovým či tyristorovými trakčními měniči; frekvence těchto složek bude v dalším značena jako f_{LOK} a vyjadřována pomocí veličiny n_{LOK} definované výrazem (3.20), kde n_{LOK} jsou lichá přirozená čísla (3, 5, 7, atd.)

$$n_{LOK} = \frac{f_{LOK}}{50}. \quad (3.20)$$

3.3.2 Výpočet hodnot vlastních frekvencí trakční napájecí soustavy [1]

Mimo elektrických hodnot obvodových prvků (L a C) ovlivňuje vlastní frekvenci trakční napájecí soustavy především její konfigurace. Pod pojmem konfigurace trakční napájecí soustavy máme na mysli tyto možnosti:

- 1) trakční napájecí stanice provozuje jeden trakční transformátor připojený bezprostředně do rozvodny dodavatele elektrické energie s neomezeným zkratovým výkonem, který napájí jednostranně jeden úsek elektrizované jednokolejné trati, napájení do „L“, nebo dvěma paralelně připojenými trakčními transformátory jednostranně dvoukolejný úsek,
- 2) trakční napájecí stanice provozuje dva paralelně pracující trakční transformátory připojené bezprostředně do rozvodny dodavatele elektrické energie s neomezeným zkratovým výkonem na totéž sdružené napětí napájecí sítě, které napájejí jednostranně jeden úsek elektrizované jednokolejné trati, napájení do „L“,
- 3) trakční napájecí stanice provozuje jeden trakční transformátor připojený bezprostředně do rozvodny dodavatele elektrické energie s neomezeným zkratovým výkonem, který napájí jednostranně jeden úsek elektrizované dvoukolejné trati, napájení do „L“,
- 4) trakční napájecí stanice provozuje jeden trakční transformátor připojený delším přívodním vedením do rozvodny dodavatele elektrické energie s neomezeným zkratovým výkonem, který napájí jednostranně jeden úsek elektrizované jednokolejné trati, napájení do „L“,
- 5) trakční napájecí stanice provozuje jeden trakční transformátor připojený bezprostředně do rozvodny dodavatele elektrické energie s neomezeným zkratovým výkonem, který napájí jednostranně dva úseky trakčního vedení téže koleje elektrizované jednokolejné trati, napájení do „T“.

3.3.3 Jeden trakční transformátor, jednokolejná trať, bez přívodního vedení [1]

Při odvozování výrazů pro výpočet vlastní frekvence trakční napájecí soustavy vyjdeme z Thomsonova výrazu:

$$f_R = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}, \quad (3.21)$$

kde ve sledované konfiguraci značí:

- L náhradní indukčnost, v daném případě trakčního transformátoru L_{TT} ,
 C kapacitu, v daném případě soustředěnou kapacitu trakčního vedení.

Uvedený výraz upravíme, zavedeme veličinu n_R a dostaneme vztah:

$$100\pi \cdot n_R \cdot L = \frac{1}{100\pi \cdot n_R \cdot C}. \quad (3.22)$$

Tento výraz značí, že na vlastní frekvenci daného zjednodušeného obvodu je indukční reaktance prvku L na levé straně výrazu rovna kapacitní reaktanci prvku C . Zaznamenejme dále, že na levé straně je v daném případě náhradní indukčnost trakčního transformátoru TNS, na druhé straně pak kapacita TV, považovaná za soustředěnou.

Podstatné je, že uvedený výraz dává pro hledané n_R pouze jedinou číselnou hodnotu, jak dosvědčuje i výchozí Thomsonův vzorec.

V dalším stupni použijeme tento postup, avšak přijmeme předpoklad, že trakční vedení napájeného úseku je nahrazeno svojí impedancí $Z_{TV,0}$, protože je na opačném konci otevřeno. Dále zavedeme na levé straně reaktanci trakčního transformátoru pro 50 Hz výrazem:

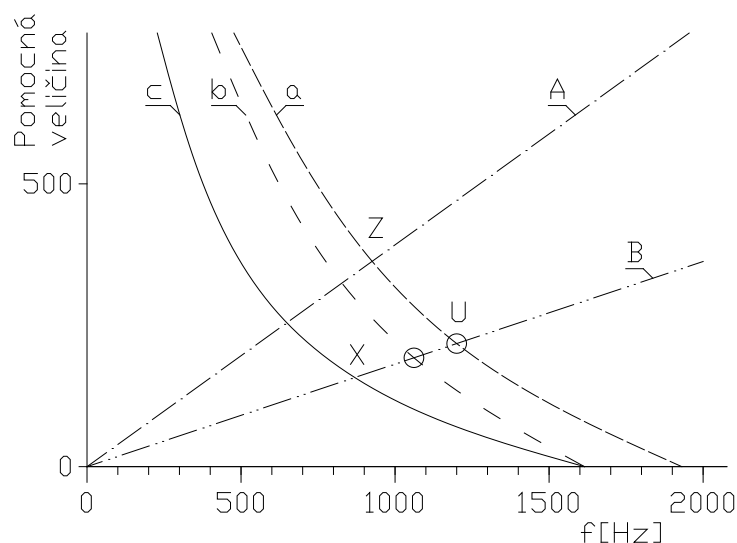
$$X_{TT,1} = 100\pi \cdot L_{TT}. \quad (3.23)$$

Dostaneme tak výraz:

$$X_{TT,1} \cdot n_R = Z_{TV,V} \cdot \cot g(\alpha_{TV,1} \cdot l_{tv} \cdot n_R) \quad (3.24)$$

Tato transcendentní rovnice slouží k výpočtu hledané hodnoty n_R . Je jisté, že rovnici lze řešit počítačem, ale vzhledem k přesnosti výchozích parametrů i pro názornost ukážeme grafickou metodu jejího řešení použitou pro vyhodnocení měření na úseku jisté zahraniční železnice.

Další podrobnosti k odvození vlastních rezonančních frekvencí napájecí soustavy jako celku v různých konfiguracích jsou uvedeny v samostatné kapitole 5 této diplomové práce.



Obr.3.4 Pomůcka pro grafické stanovení rezonanční frekvence trakčního obvodu

Obr.3.4 je založen na následujících číselných hodnotách, platných pro číselný příklad na úseku jisté zahraniční železnice při zanedbání délky primárního přívodního vedení:

- délky napájených úseků TV jsou: $l_{TV,a} = 34,0 \text{ km}$,
 $L_{TV,b} = 28,5 \text{ km}$,
- měrná indukčnost TV pro 1000 Hz: $L_{TV} = 1,432 \text{ mH/km}$,
- měrná kapacita TV: $C_{TV} = 14,0 \text{ nF/km}$,
- náhradní reaktance trakčního transformátoru (50 Hz): $X_{TT,1} = 9,375 \Omega$,
- závitový převod trakčního transformátoru: $p = 4,8$,
- délka primárního přívodního vedení: $l_E = 5,0 \text{ km}$.

Obr.3.4 má na:

- vodorovné ose vynesenu stupnici vlastních frekvencí,
- svislé ose pomocnou veličinu vyjadřující hodnoty na levé a pravé straně základní výpočtové rovnice.

Hledaná hodnota vlastní frekvence je pak dána průsečíkem dvou křivek, a to:

- křivky pravé strany základní výpočtové rovnice (charakter funkce kotangens), značené v obrázku symbolem „a“ (pro délku TV 28,5 km), případně „b“ (pro délku TV 34,0 km), nebo „c“ (pro součtovou délku TV 62,5 km),

- křivky podle levé strany základní výpočtové rovnice (v daném případě zanedbání délky primárního přívodního vedení to jsou přímky), značené v obrázku symbolem „A“ (dvojkolejná trať napájená jedním trakčním transformátorem), nebo „B“ (jednokolejná trať napájená jedním trakčním transformátorem nebo dvojkolejná trať napájená dvěma paralelně pracujícími trakčními transformátory).

Obrázek dává například pro délku trakčního vedení jednokolejného napájeného úseku 28,5 km (křivka „a“) a jeden trakční transformátor (přímka „B“) hodnotu první vlastní frekvenci celé takto konfigurované napájecí soustavy hodnotu danou bodem „U“ jako průsečíkem obou uvedených čar, to je 1195 Hz.

Pozn.: číselnou hodnotu pomocné veličiny na svislé ose není nutno odečítat

Prodloužíme-li délku trakčního vedení napájeného úseku, např. na hodnotu 34 km, pak křivka „b“ dává s přímkou „B“ průsečík na hodnotě první vlastní frekvence 1060 Hz.

Tyto hodnoty vlastní frekvence však nejsou jediné. Podíváme-li se na závislost funkce kotangens na hodnotách jejího argumentu, vidíme, že *obr.3.4* je svým významem v podstatě první částí funkce kotangens, platící pro interval argumentu funkce kotangens od 0 do $\pi/2$, kam je ještě nutno doplnit skloněnou přímkou představující reaktanci trakčního transformátoru, analogicky jako probíhá přímka „B“ *obr.3.4*.

Z názoru je ihned patrné, že:

- vlastních frekvencí je neomezený počet, protože reálné průsečíky přímky a křivek funkce kotangens vzniknou ještě v intervalu argumentu této funkce π až $3\pi/2$, dále 2π až $5\pi/2$ atd., protože v těchto intervalech argumentu má vstupní impedance trakčního vedení kapacitní charakter,
- jednotlivé číselné hodnoty vlastních frekvencí nejsou vzájemným násobkem ani násobkem 50 Hz.

3.3.4 Experimentální ověření [1]

Na úseku zahraniční železnice bylo provedeno experimentální měření pro stanovení vlastní frekvence trakční napájecí soustavy.

Trakční napájecí stanice byla připojena 5 km dlouhým venkovním vedením 120 kV do rozvodny se zkratovým výkonem 2000 MVA. Vzhledem ke krátké délce tohoto vedení bylo možno jeho vliv zanedbat.

Frekvenční analýza proudů sledovaných při měření používala pouze liché násobky základní frekvence 50 Hz, tedy s krokem 100 Hz.

Jako zdroj lichých harmonických posloužila elektrická lokomotiva s fázovým řízením o výkonu 3820 kW. Tato lokomotiva projížděla měřený úsek rychlostí 45 km/h a její primární proud (proud sběrače) byl udržován konstantní připojenou brzdou lokomotivou. Trakční měnič lokomotivy měl dva do série zapojené fázově řízené můstky, z nich první byl otevřen úplně, druhý na 50 %. Spektrum proudu odebíraného lokomotivou bylo snímáno přímo na vozidle.

Měřený úsek byl dvoukolejný složený ze dvou úseků téže koleje o délkách 28,5 km a 34,0 km. Na úseku s délkou 28,5 km byly osazeny tři měřicí body, a to:

- v trolejovém vedení těsně u trakční napájecí stanice (MB 1),
- 9,3 km od trakční napájecí stanice (MB 2),
- 18,6 km od trakční napájecí stanice (MB 3 pouze pro druhou sérii měření).

a) konfigurace trakční napájecí stanice v první sérii měření

- pro napájení byl použit pouze jeden trakční transformátor,
- pod napětím bylo trakční vedení pouze kratšího úseku 28,5 km s měřicími body 1 a 2,
- zkušební lokomotiva pojížděla pouze po tomto úseku.

b) konfigurace trakční napájecí stanice v druhé sérii měření

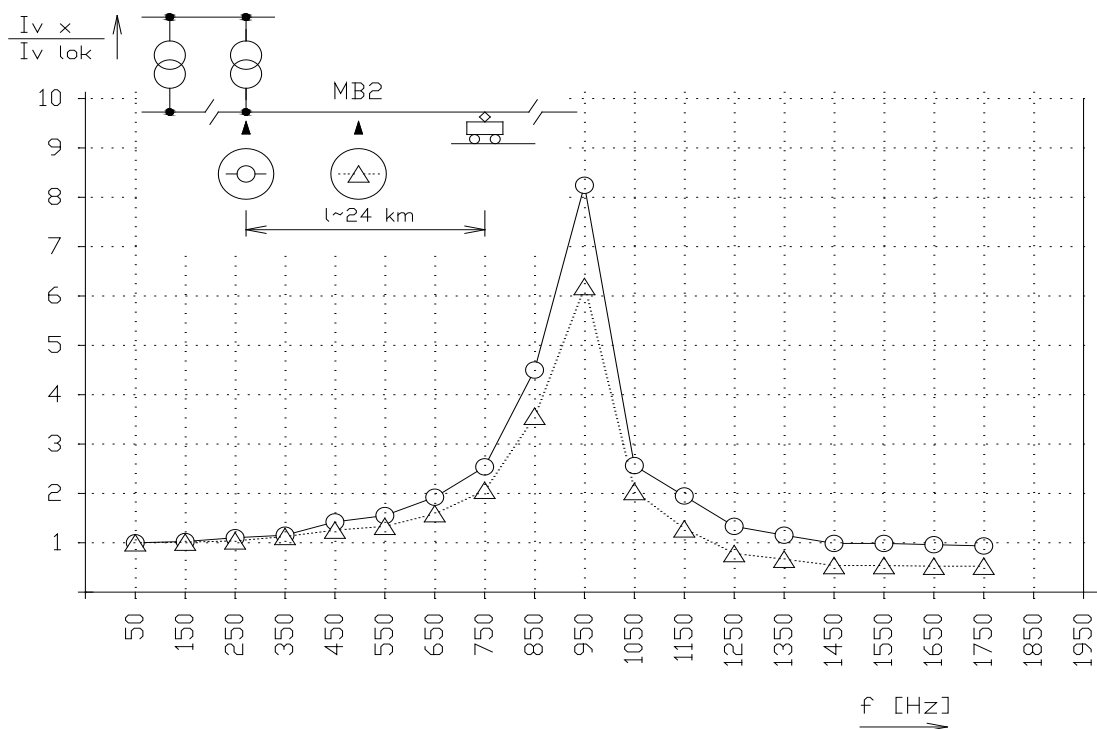
- pro napájení byly použity oba trakční transformátory připojené na totéž sdružené napětí,
- trakční vedení obou úseků byla u trakční napájecí stanice propojena,
- zkušební lokomotiva pojížděla po celém úseku s délkou $28,5+34=62,5$ km,
- měřicí body byly doplněny bodem 3 a ležely pouze na kratším úseku s délkou 28,5 km.

Hodnoty proudů naměřené na měřicích bodech umístěných na trati byly přepočtem vztaženy pro jednotlivé liché harmonické vždy ke stejné frekvenční složce změřené na lokomotivě a vyneseny na diagramech platících vždy pro danou vzdálenost lokomotivy od trakční napájecí stanice.

Tímto postupem vznikly diagramy uvedené na *obr.3.5 – 3.7*, majících na vodorovné ose vyneseno měřítko frekvencí spektrálních složek, na svislé ose pak poměr hodnot proudových složek změřených v měřicích bodech na trati a vztažených na proudovou složku zjištěnou na lokomotivě.

3.3.5 Výsledky první série měření

Obr.3.5 platí pro první sérii měření a pro dva měřící body s tím, že lokomotiva byla v okamžiku odečtů cca 24 km od trakční napájecí stanice. Podle popisu patří sytě vynesená spojnice naměřených bodů měřícímu místu přímo u trakční napájecí stanice, čárkovaná spojnice pak bodu 9 km od trakční napájecí stanice.

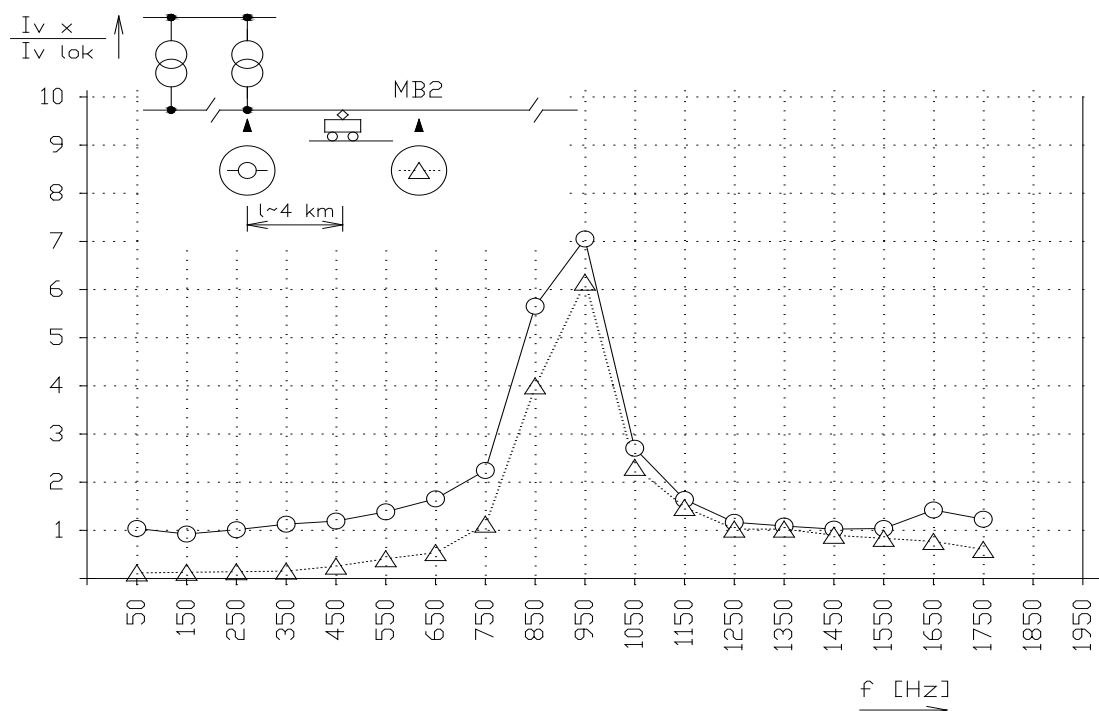


Obr.3.5 Měřením stanovené poměry při jednostranném napájení jednoho napájecího úseku (napájení podle „L“) jedním trakčním transformátorem, hnací vozidlo je poblíž vzdáleného konce napájeného úseku

Z obrázku je patrné, že:

- v obou měřících bodech byly zjištěny maximální hodnoty poměru spektrální složky proudu v měřícím bodě ke složce proudu zjištěné na lokomotivě pro složku téže frekvence v blízkosti frekvence 950 Hz,
- větší hodnota tohoto poměru byla zjištěna v měřícím bodě těsně u trakční napájecí stanice (bod 1), kde dosáhla hodnoty cca 8,4, zatímco v měřícím bodě 2 dosáhl tento poměr pouze hodnoty cca 6,2,

- pro frekvenci 50 Hz má uvedený poměr v obou měřících bodech jednotkovou hodnotu,
- zjištěná hodnota frekvence 950 Hz dobře odpovídá hodnotě 928 Hz dané průsečíkem přímky „A“ s křivkou „a“ a značeném v *obr.3.4* jako bod „Z“. Uvedená nepřesnost může být způsobena mimo jiné i dosti velkým krokem spektrální analýzy (100 Hz).



Obr.3.6 Měřením stanovené poměry při jednostranném napájení jednoho napájecího úseku (napájení podle „L“) jedním trakčním transformátorem, avšak hnací vozidlo je poblíž trakční napájecí stanice

Z obrázku je patrné, že:

- v obou měřících bodech byly zjištěny maximální hodnoty sledovaného poměru proudových složek v podstatě pro stejnou frekvenci 950 Hz,
- tučně vykreslená spojnice naměřených poměrů svědčí o jistém malém poklesu této frekvence, i když čárkované spojnice potvrzují přesně hodnotu 950 Hz,
- totéž potvrzují i maximální hodnoty sledovaného poměru, které pro měřící bod 2 mají stejnou hodnotu jako platí pro lokomotivu na konci napájeného úseku (6,2), avšak pro měřící bod 1 se poněkud liší,

- pro frekvenci 50 Hz má uvedený poměr v bodě 1 hodnotu 1, zatímco pro měřicí bod 2 je tento poměr anulován,
- podstatné je však zjištění, že v měřicím bodě 2, ležícím mezi polohou lokomotivy a otevřeným koncem napájeného úseku, probíhá nenulová spektrální složka proudu trakčního vedení, a to k otevřenému konci napájeného úseku,
- její hodnota je pro frekvenci 950 Hz více než šestinásobkem hodnoty této složky produkované lokomotivou.

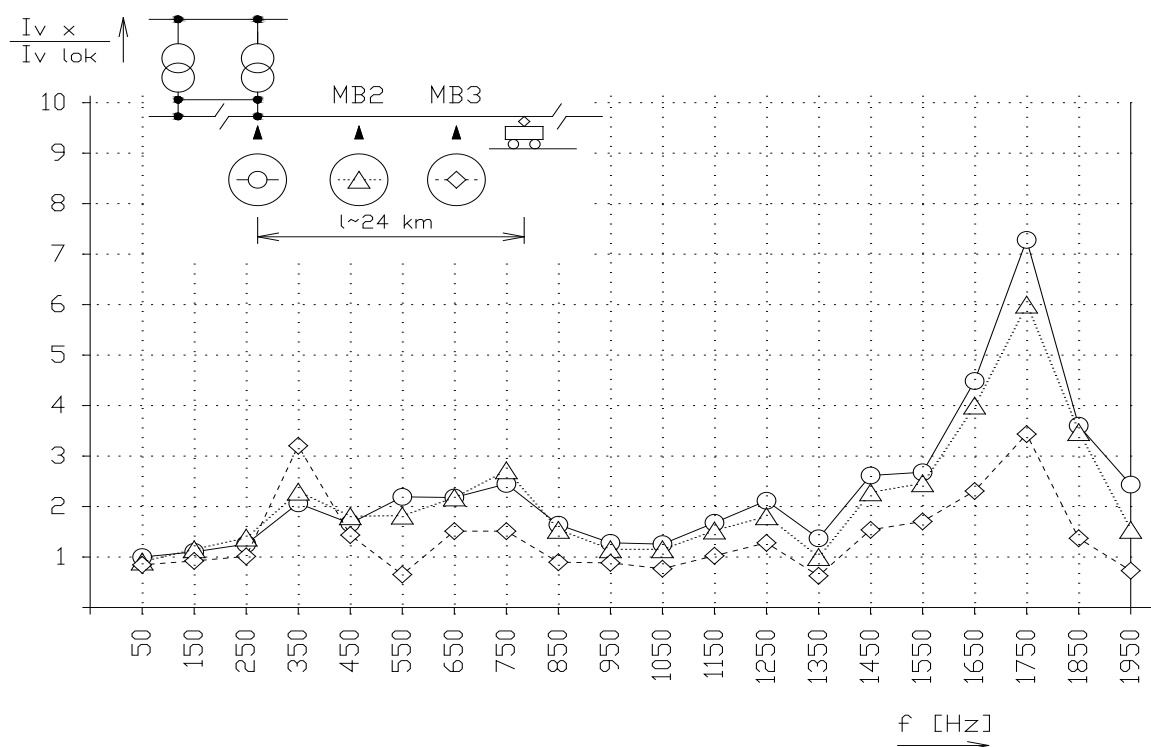
3.3.6 Výsledky druhé série měření

Další diagram náleží druhé sérii měření. Zde došlo ke změnám v konfiguraci trakční napájecí soustavy:

- oba úseky trakčního vedení byly v trakční napájecí stanici propojeny na celkovou délku 62,5 km,
- pro napájení byly použity oba trakční transformátory zapojené atypicky, tj. na totéž sdružené napětí sítě 120 kV,
- měřicí body 1 a 2 zůstaly a byly doplněny měřicím bodem 3.

Pozn.: Při organizaci jakéhokoliv experimentu hledajícího neznámé závislosti je zásadou, že se doporučuje změnit pouze jeden parametr obvodu, aby bylo možno jednoznačně vyšetřit vliv této změny. Zde se organizátoři experimentu dopustili chyby, když změnili současně dva parametry napájecí soustavy, a to:

- *použili pro napájení úseků dvojici trakčních transformátorů zapojených paralelně,*
- *změnili celkovou délku napájených úseků TV podélným propojením TV před napájecí stanicí.*



Obr.3.7 Měřením stanovené poměry při jednostranném napájení dvou napájených úseků (napájení podle „T“) dvěma paralelně zapojenými trakčními transformátory, hnací vozidlo je poblíž vzdáleného konce napájeného úseku

Z obrázku vyplívají následující skutečnosti:

- prakticky ve všech třech měřicích bodech dosáhl sledovaný poměr spektrálních složek proudu svého maxima pro tutéž frekvenci 1750 Hz,
- číselné hodnoty tohoto poměru rostou s tím, jak se měřicí bod přibližuje k trakční napájecí stanici, přičemž největší hodnoty cca 7,4 platí pro měřicí bod 1, pro měřicí bod 2 platí cca 6 a pro měřicí bod 3 jen cca 3,5,
- pro frekvenci 50 Hz má uvedený poměr ve všech měřicích bodech jednotkovou hodnotu,
- zjištěná hodnota frekvence 1750 Hz dobře odpovídá hodnotě 1790 Hz dané průsečíkem přímky „B“ s druhou větví křivky „c“ a značeném v obr.3.4 jako bod „X“: Uvedená nepřesnost může být způsobena mimo jiné i dosti velkým krokem spektrální analýzy (100 Hz),
- tato frekvenční složka vykázala v měřicím bodě MB 1 hodnotu sledovaného poměru cca 7,4, zatímco ve zbývajících dvou měřicích bodech hodnoty tohoto poměru klesají (v měřicím bodě 2 je cca 6, v měřicím bodě 3 cca 3,5),

- je pozoruhodné, že druhá hodnota vlastní frekvence napájecí soustavy, daná bodem „X“ v tomto výpočtovém diagramu (874 Hz), se v naměřených hodnotách projevila jistým poklesem hodnot sledovaného poměru.

Závažné je zjištění, že hodnoty vlastních frekvencí trakční napájecí soustavy získané z *obr.3.5*, *3.6* a *3.7* nejsou prakticky vůbec ovlivněny změnami polohy elektrického hnacího vozidla. Tyto hodnoty závisí pouze na konfiguraci trakční napájecí soustavy a na elektrických i geometrických vlastnostech jejích prvků. Tímto se potvrzuje skutečnost, že uvedené hnací vozidlo se vůči napájecí soustavě chová jako velká impedance, což je charakteristické pro generátor proudových harmonických.

Podél traťových úseků jsou položena kabelová vedení pro přenos informací (telefonické hovory, dálkové ovládání, přenos dat apod.). Pro vyšetřování vlivu trakčního vedení na tato souběžná sdělovací vedení je podstatné zjištění, patrné především z *obr.3.6*. Na tomto obrázku totiž je hnací vozidlo v blízkosti trakční napájecí stanice, takže:

- existence rezonancí zesílené složky proudu tekoucího měřícím bodem 1 je pochopitelná,
- méně očekávaný je průchod rezonancí zesílené složky proudu tekoucího měřícím bodem 2 směrem k otevřenému konci trakčního vedení.

3.3.7 Odezva trakční napájecí soustavy na budící signál [1], [7]

Trakční napájecí soustava vykazuje neomezený počet hodnot vlastních frekvencí. Číselné hodnoty těchto frekvencí závisí nejen na elektrických parametrech jednotlivých prvků této soustavy, ale i na její konfiguraci a geometrických délkách trakčního vedení.

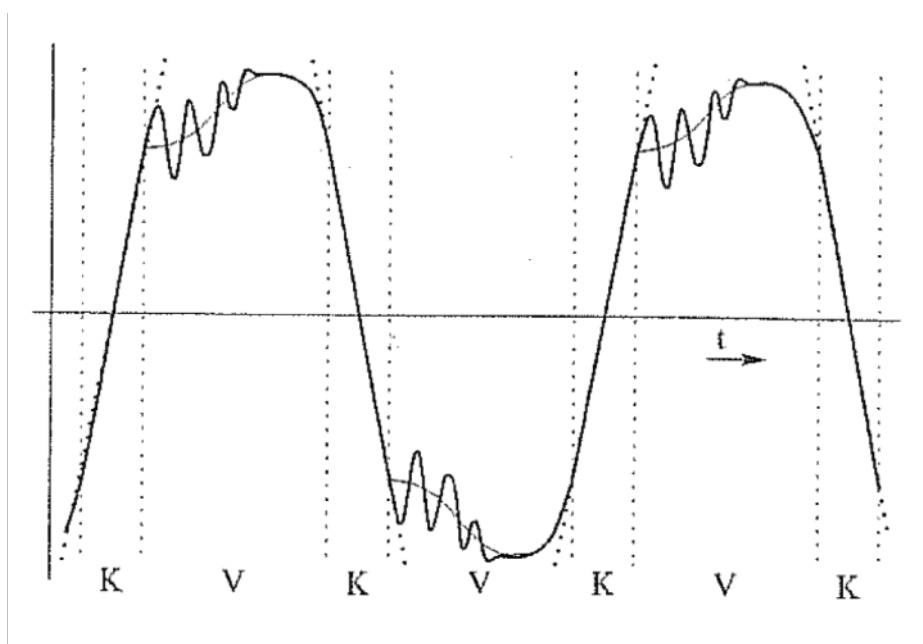
Podstatná je skutečnost, že reálné složky elektrických parametrů této soustavy mají velmi malé hodnoty ve srovnání se složkami imaginárními. To značí, že trakční napájecí soustava vytváří složitý elektrický obvod schopný kmitání, bude-li vhodně buzen.

V dalším rozboru budeme sledovat odezvy trakční napájecí soustavy jako pasivního členu na buzení aktivním prvkem, kterým je elektrické hnací vozidlo. Zde je možné rozlišovat dva typy buzení, kdy:

- a) budícím signálem je některá z proudových harmonických produkovaných elektrickými hnacími vozidly, v daném případě vybavenými vstupním trakčním měničem typu neřízeného diodového usměrňovače, případně fázově řízeným polovodičovým měničem,

- b) budícím signálem je přerušení fiktivního zkratového proudu na sekundárním vinutí vozidlového trakčního transformátoru doprovázeného skokovou změnou časové derivace proudu odebíraného hnacím vozidlem, k čemuž dochází dvakrát za periodu 50 Hz v okamžiku ukončení období komutace proudu trakčního měniče elektrických hnacích vozidel.

Budící signál podle bodu a) obsahuje v trakčně ustáleném režimu hnacího vozidla všechny liché harmonické složky, jejichž největší číselné hodnoty na jeho sběrači je možno definovat pomocí tzv. „amplitudového zákona“ ($I_h = 100/h [\%]$). Jedná se tedy o tzv. tvarové harmonické doprovázející jízdu hnacího vozidla s diodovým trakčním měničem trvale po celou dobu jízdy výkonem.



Obr.3.8 Ukázka časového průběhu proudu na vývodu trakční napájecí stanice (silná čára) a na sběrači hnacího vozidla s diodovým trakčním měničem (tenká čára)

Obr.3.8 tenkou čarou uvádí překreslený oscilogram časového průběhu proudu na sběrači „diodového“ hnacího vozidla. Na tomto průběhu jsou patrné v rozmezí jedné poloperiody napájecího napětí tyto dva časové intervaly:

- interval značený „V“, kdy trakční výkon prochází diodovým měničem a vyhlazovací tlumivkou do dvojice paralelně zapojených trakčních motorů. V tomto intervalu má časový průběh mírně zvlněnou vodorovnou fázi, což je dáno konečnou hodnotou indukčnosti vyhlazovací tlumivky, a tedy neúplně vyhlazeným proudem přiváděným do trakčních motorů,
- interval značený „K“, kdy v trakčním usměrňovači probíhá komutace proudu, v důsledku čehož je sekundární vinutí vozidlového transformátoru dočasně zkratováno.

Časový průběh znázorněný na *obr.3.8* je zdrojem tvarových harmonických proudů všech lichých řádů a tvoří tedy budící signál typu a).

Podstatným poznatkem z *obr.3.8* je, že:

- přechod mezi intervalem „V“ a intervalem „K“ není doprovázen podstatnou změnou směrnice časového průběhu odebíraného proudu, což značí, že vznik fiktivního zkratu sekundárního vinutí není podstatným zdrojem budícího signálu typu b),
- přechod mezi intervalem „K“ do intervalu „V“ nastávající v okamžiku ukončení období komutace a tedy v okamžiku vypnutí fiktivního zkratu sekundárního vinutí vozidlového transformátoru na rozdíl od předchozího vyvolává podstatnou změnu směrnice časového průběhu odebíraného proudu a vytváří tak budící signál typu b). Zde nutno zdůraznit, že tento okamžik nastává za jízdy hnacího vozidla výkonem zcela pravidelně, a to dvakrát za periodu napájecího napětí, tedy vždy po 10 ms.

3.3.8 Chování trakční napájecí soustavy na její vlastní frekvenci [1]

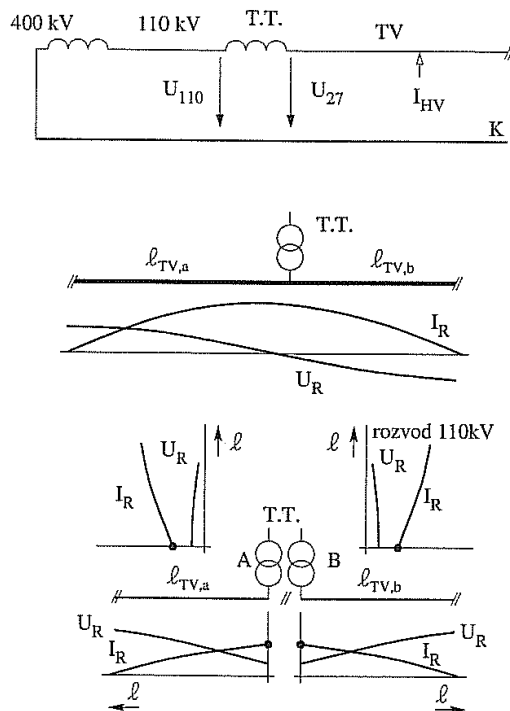
Zásadní vliv na chování trakční napájecí soustavy má její konfigurace. Tím máme na mysli schéma připojení trakční napájecí stanice k trakčnímu vedení.

Zde jsou dvě možná schémata napájení, a to:

- schéma zvané „L“, které je charakterizováno tím, že jeden trakční transformátor napájí traťový směr „doleva“, druhý trakční transformátor napájí směr „doprava“ nezávisle na tom, zda se jedná o jednokolejný či dvoukolejný traťový úsek. Toto schéma se používá na traťových úsecích značně trakčně zatížených, případně v místech, kde je trakční napájecí stanice připojena na síť 110 kV s menším zkratovým výkonem, aby se poněkud snížila nesymetrie zátěže této sítě,
- schéma zvané „T“, které používá pro napájení obou traťových směrů pouze jeden trakční transformátor, opět nezávisle na tom, zda se jedná o jednokolejný či dvoukolejný traťový úsek.

Nutno zdůraznit, že v obou schématech je trolejové vedení napájeno jednostranně, tedy proti sousední trakční napájecí stanici je zajištěno elektrické podélné dělení, např. formou spínací stanice.

Elektrický stav v trakční napájecí soustavě pro obě schémata je znázorněn na *obr.3.9*.



Obr.3.9 Prostorové rozdělení napětí a proudu rezonující frekvenční složky při napájení podle „T“ a podle „L“

V horní části obrázku je znázorněno zjednodušené náhradní schéma celé trakční napájecí soustavy.

Střední část obr.3.9 ukazuje napájecí schéma podle „T“, kdy trakční napájecí stanice je umístěna poblíž středu délky trakčního vedení. Pak na trakčním vedení vytváří složka s vlastní frekvencí trakčního obvodu stojatou vlnu:

- proudu, mající
 - kmitnu uprostřed délky trakčního vedení,
 - uzly na obou otevřených koncích trakčního vedení,
- napětí, mající
 - kmitnu na obou otevřených koncích trakčního vedení,
 - uzel uprostřed této délky, tedy prakticky vždy poblíž trakční napájecí stanice.

Tento obraz odpovídá obr.3.7, alespoň pokud se týká proudu v trolejovém vedení, protože napěťové poměry se při měření na úseku zahraniční železnice nesledovaly. Z křivky průběhu napětí na trolejovém vedení je dále patrné, že složka napětí s vlastní frekvencí napájecí soustavy v bodě připojení trakční napájecí stanice je velmi malá a při přesně středovém umístění trakční napájecí stanice se anuluje. Z toho vyplývá, že složka proudu s touto frekvencí se do trakční napájecí stanice a dále do sítě 110 kV prakticky nedostane a probíhá pouze v trakčním vedení. Podstatný je však důsledek spočívající v tom, že složka proudu s vlastní frekvencí trakční

napájecí soustavy probíhá v celé délce obou napájených úseků a může tak nepříznivě ovlivnit souběžná sdělovací vedení.

Trakční vedení se v tomto schématu napájení chová pro složku vlastní frekvence trakční napájecí soustavy jako půlvlnné vedení buzené v libovolném bodě hnacím vozidlem, v případě ČD vozidlem mající charakter proudového zdroje všech lichých harmonických základní frekvence sítě 50 Hz. Napěťová složka této frekvence v bodech vzniklých kmiten (na obou otevřených koncích trakčního vedení) způsobuje zvýšenou deformaci časového průběhu trakčního napětí, což se však nijak škodlivě neprojevuje.

Dolní část *obr.3.9* popisuje napájení podle schématu „L“. Podstatný je rozdíl v průběhu proudové a napěťové složky s vlastní frekvencí napájecí soustavy, kdy stojatá vlna:

- proud má
 - kmitnu za bodem připojení trakční napájecí stanice k síti 110 kV, tedy mimo trakční napájecí soustavu,
 - uzel na otevřeném konci trakčního vedení,
- napětí má
 - kmitnu na otevřeném konci trakčního vedení,
 - uzel za bodem připojení trakční napájecí stanice k síti 110 kV, tedy mimo trakční napájecí soustavu.

Trakční vedení se v tomto schématu napájení chová pro složku vlastní frekvence trakční napájecí soustavy jako čtvrtvlnné vedení zakončené impedancí trakční napájecí stanice a přírodního vedení 110 kV a buzené v libovolném bodě hnacím vozidlem, v případě ČD vozidlem majícím charakter proudového zdroje všech lichých harmonických základní frekvence sítě 50 Hz. Napěťová složka této frekvence v bodě vzniklé kmitny (na otevřeném konci trakčního vedení) způsobuje zvýšenou deformaci časového průběhu trakčního napětí, což se však nijak škodlivě neprojevuje.

Závažná je však okolnost, týkající se proudové vlny s vlastní frekvencí trakční napájecí soustavy. Zatím co ve schématu „T“ tato proudová vlna prakticky neprocházela trakční napájecí stanicí, ve schématu „L“ naopak v trakční napájecí stanici a dále v síti 110 kV vzniká kmitna této frekvenční složky. Důsledkem pak je nežádoucí zvětšení napěťové složky této frekvence v místě připojení trakční napájecí stanice k síti 110 kV vznikající podle Ohmova zákona součinem proudové složky této frekvence a vstupní impedance sítě 110 kV platící pro tuto frekvenci.

4. Konfigurace filtračně kompenzačního zařízení v trakční napájecí stanici

Odstranění ovlivňování trakční jednofázové soustavy 25 kV, 50 Hz ČD působící na napájecí síť 110 kV vedlo k řešení, kdy do trakčních napájecích stanic se pro zlepšení nevyhovujícího účinníku hnacích vozidel a pro omezení napěťových či proudových harmonických v přípojovacím bodě TNS instalují filtračně-kompenzační zařízení (FKZ).

4.1 Vznik jalového výkonu v trakční soustavě [1]

V podmínkách trakčního odběru AC soustavy vzniká největší podíl jalového výkonu při použití hnacích vozidel s diodovými či tyristorovými trakčními měniči, která jsou na ČD provozována v převážné míře. Číselná hodnota DPF na vstupu TNS vlivem takto koncipovaných hnacích vozidel se pohybuje v průměru kolem hodnoty 0,84.

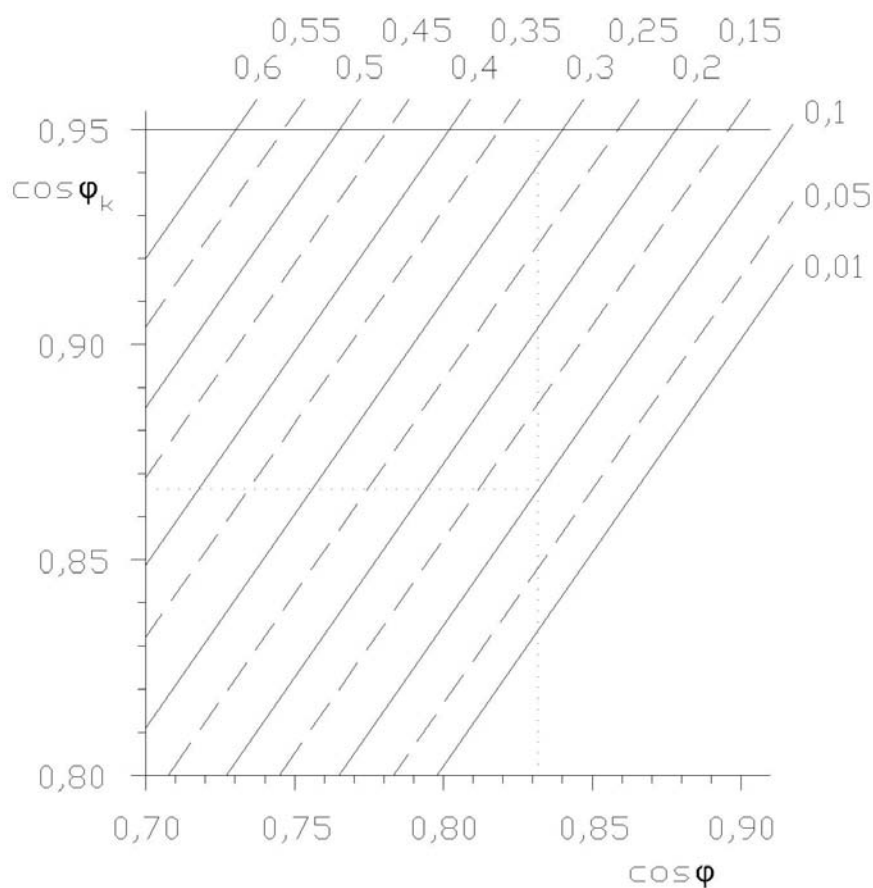
Hodnotu potřebného kapacitního výkonu kompenzačního zařízení lze určit z výrazu:

$$Q_K = P_{TNS} \cdot \{tg[\arccos(\cos \varphi)] - tg[\arccos(\cos \varphi_K)]\}, \quad (4.1)$$

kde je

Q_K	potřebný kapacitní výkon,
P_{TNS}	činný výkon trakční napájecí stanice,
$\cos(\varphi)$	účinník odběru bez kompenzačního zařízení,
$\cos(\varphi_K)$	účinník požadovaný s použitím kompenzace.

Pro předběžný odhad kompenzačního výkonu můžeme použít následující výpočetní diagram, viz. *obr.4.1*.



Obr.4.1 Výpočtový diagram pro stanovení potřebného kompenzačního výkonu pro vykompenzování nevyhovujícího účinníku při známé hodnotě činného výkonu spotřebiče

Na vodorovné ose výpočetního diagramu jsou výchozí hodnoty účinníku DPF (značené $\cos \varphi$), které nutno kompenzovat. Na svislé ose jsou hodnoty účinníku DPF, které mohou být dosaženy kompenzací (značené $\cos \varphi_k$).

Parametrem soustavy křivek je podíl:

$$\frac{Q_K}{P_{TNS}} = \frac{Q_K \cdot h}{A_{P,TNS}}, \quad (4.2)$$

kde je

$A_{P,TNS}$ činná práce odebraná TNS,
 h časový interval, za který byla činná práce odebrána.

Z výpočtového diagramu a vzorce vyplývají dva poznatky:

- kompenzační výkon pro dosažení neutrální hodnoty účinníku DPF musí být přizpůsoben hodnotě činného trakčního výkonu a příslušná zařízení je nutno navrhovat s elektrickými parametry odpovídajícími individuálním poměrům TNS,
- v případě trvalejšího zvýšení hodnoty trakčního výkonu, např. připojením dalšího elektrizovaného úseku, je nutno počítat případně se zvětšením kompenzačního výkonu, pokud již při původním návrhu s touto možností nebylo počítáno. Dodatečné zvýšení kompenzačního výkonu již instalovaného FKZ není v principu možné s ohledem na výkon jeho dekompenzační větve i na impedanci napájecí soustavy pro signál HDO.

4.2 Funkce filtračně kompenzačního zařízení (FKZ) v AC trakční napájecí stanici

Filtračně kompenzační zařízení má v AC trakční napájecí stanici zajistit následující úkoly:

- vykompenzovat induktivní jalový výkon elektrických hnacích vozidel s diodovým, či tyristorovým trakčním měničem tak, aby v připojovacím bodě trakční napájecí stanice k síti 110 kV dodavatele elektrické energie byl dodržen induktivní účinník základní harmonické DPF v rozmezí hodnot 0,95 až 0,98,
- zabránit přechodu hodnot účinníku DPF do kapacitní oblasti v případě, že odpadl trakční odběr (úkol dekompenzační větve),
- omezit hodnoty napěťových či proudových harmonických v připojovacím bodě trakční napájecí stanice k síti 110 kV dodavatele elektrické energie tak, aby v tomto bodě byly dodrženy mezní hodnoty jednotlivých harmonických požadované dodavatelem elektrické energie,
- zajistit, aby vstupní impedance TNS jako celku, včetně připojených úseků trakčního vedení, splňovala pro ovládací frekvenci HDO dodavatele elektrické energie jím požadovanou minimální hodnotu, a to jak při chodu TNS trakčně naprázdno, tak i s předepsaným trakčním odběrem.

Tyto požadavky se v podmínkách ČD podařilo vyřešit pomocí pasivních výkonových prvků sestávajících:

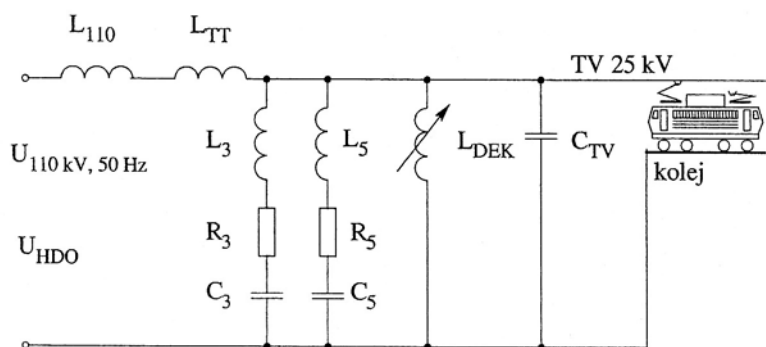
- z kompenzačních kondenzátorů,
- z rezonančních tlumivek,
- z dekompenzační větve se snižovacím transformátorem, fázovým regulátorem a tlumivkou.

FKZ je vždy připojeno k jednomu trakčnímu transformátoru. Pokud se v napájecí stanici předpokládá provoz oběma trakčními transformátory, pak každý z nich je vybaven vlastním FKZ.

4.3 Koncepce FKZ v trakčních napájecích stanicích [1]

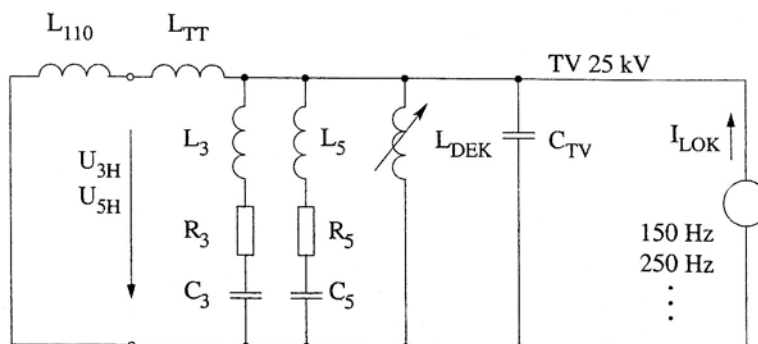
FKZ využívá sériové rezonanční větve L-C zapojené mezi přípojnici 27 kV a zpětné vedení. Tyto L-C větve slouží k omezení valné části složek proudových lichých harmonických tak, aby nepostupovaly dále přes trakční transformátor do přípojovacího bodu TNS, kde by na vstupní impedanci přívodního vedení dodavatele elektrické energie způsobily vznik nadměrných napěťových harmonických či překročily dovolené mezní hodnoty proudových harmonických.

Obr.4.2 znázorňuje obecně použitelné náhradní schéma celé trakční napájecí soustavy počínaje vzdálenou rozvodnou dodavatele elektrické energie napájecí přívodní vedení 110 kV do TNS.



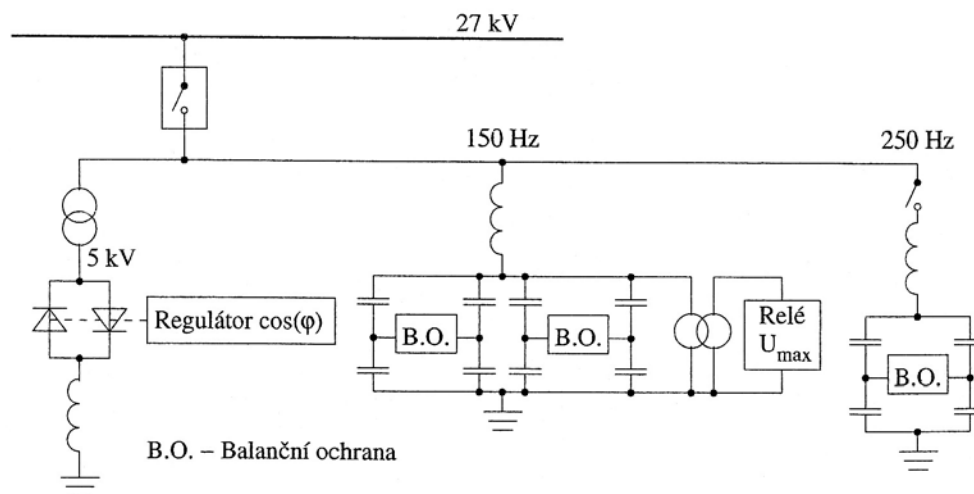
Obr.4.2 Obecně platné náhradní schéma napájecí soustavy 25 kV, 50 Hz ČD

Obr.4.3 uvádí úpravu obecně použitého schématu z obr.4.2, toto schéma platí pro harmonické produkované hnacím vozidlem s diodovým či tyristorovým trakčním měničem.



Obr.4.3 Náhradní schéma napájecí soustavy 25 kV, 50 Hz z hlediska harmonických

Přehledové schéma regulovaného FKZ používaného na ČD.



Obr.4.4 Přehledové schéma regulovaného FKZ používaného v TNS ČD

4.3.2 Ladění L-C rezonančních větví FKZ

Závažným problémem je otázka naladění jednotlivých větví. Tyto větve, připojené mezi sběrnici 27 kV a zpětné vedení, v podstatě působí jako zkrat té frekvenční složky, na kterou jsou naladěny.

Z důvodu možnosti zavlečení 3. harmonické ze strany napájecí sítě 110 kV, která by mohla přetížit výkonové prvky, se nedoporučuje L-C větev pro 3. harmonickou ladit „ostře“, tj. na 150 Hz. Dáváme přednost ladění „neostrému“, například na frekvenci 147,5 Hz ($n = 2,95$), přestože ladění na 150 Hz by bylo účinnější.

Naproti tomu L-C větev pro 5. harmonickou, případně i pro další harmonické, lze již ladit „ostře“, tedy na frekvenci 250 Hz. Jejich obsah v napětí sítě 110 kV, ani v proudu trakčního vedení se totiž neprokázal takový, aby dosáhl hodnoty, která by mohla ohrozit výkonové prvky L-C větví.

Kondenzátory L-C větví jsou z celého FKZ nejcitlivější na nadměrné napěťové namáhání.

4.3.3 Funkce dekompenzační větve FKZ

Dekompenzační větev musí zajistit, aby v případě zániku trakčního odběru nedošlo k překompenzování, tj. k přechodu účinnosti DPF z charakteru indukčního do kapacitního. V takovém případě by se TNS stala odběratelem kapacitního výkonu, což podmínky na dodávku elektrické energie hodnotí poměrně vysokou sazbou.

Jalový induktivní výkon dekompenzační větve musí být větší, než je kompenzační výkon všech L-C větví, a to o kapacitní výkon vlastního napájeného trakčního vedení. Na druhé straně musí indukční výkon klesnout k nule, pokud má trakční odběr velkou hodnotu.

4.4 Technické řešení filtračně kompenzačního zařízení v trakční rozvodně 25 kV [9]

4.4.1 Základní údaje

FKZ je tvořeno dvěma filtračními větvemi. První zabezpečuje filtraci 3. harmonické a druhá filtraci 5. harmonické. FKZ je doplněno o třetí větev a tou je větev dekompenzační, jež je plynule řiditelná v rozsahu $0 - Q_{\text{MAX}}$. Filtry jsou navrženy na jmenovité napětí 27 kV. Dekompenzační tlumivka a tyristorový regulátor jsou k trakčnímu obvodu připojené přes snižovací transformátor.

Indukčnosti a kapacity filtrů a dekompenzační větve jsou obvykle situovány na venkovním stanovišti. Tyristorový regulátor a snižovací transformátor je umístěn do zděného objektu.

Ovládání FKZ je možné místní z řídících skříní v rozvodně 27 kV, dálkové z místního řídícího systému (MŘS) v dozorně nebo ústřední z řídícího stanoviště elektrodispečinku ČD.

4.4.2 Výchozí údaje vybrané TNS Břeclav

Návrh FKZ je proveden za předpokladu, že TNS napájí jedním transformátorem úsek trakčního vedení mezi sousedními spínacími stanicemi. Náhradní kapacita TV se uvažuje 15 nF/km (TV bez zesilovacího vedení).

Pokud budou v TNS v provozu oba trakční transformátory včetně obou FKZ, budou sledované hodnoty příznivější.

Vybrané FKZ je navrženo s kompenzačním výkonem 4616 kVAr, který je instalovaný ve filtrech pro 3. a 5. harmonickou. Do dekompenzačního výkonu FKZ TNS Břeclav je započítána rezerva pro filtr 7. harmonické 117 kVAr.

Kapacita napájeného TV je 4,215 μF . Této kapacitě odpovídá jalový kapacitní výkon a 1001 kVAr. Celkový kapacitní (kompenzační) výkon je tedy 5617 kVAr. Tyto hodnoty byly uvedeny v poplávce na zařízení dekompenzační větve.

Dnes běžně užívané FKZ tvoří:

- L-C filtr pro 3. harmonickou,

- L-C filtr pro 5. harmonickou,
- dekompenzační obvod pro rychlou a plynulou regulaci jalového výkonu FKZ v rozsahu 0 - Q_{MAX} .

4.4.3 Použité přístroje

Tlumivky filtrů – jsou navrženy vzduchové tlumivky s odbočkami, jsou v provedení pro venkovní prostředí, krytí IP00. Vinutí tlumivek je hliníkové. Jsou postaveny na venkovních izolátorových podpěrkách pro nejvyšší napětí 38,5 kV, které jsou součástí jejich dodávky. S ohledem na rozptylové magnetické pole tlumivek je třeba respektovat jejich ochranný prostor, který je do vzdálenosti 0,6D od čel tlumivky a 0,9D do stran měřeno od osy tlumivky (D – průměr vinutí). V tomto prostoru nesmí být ocelové konstrukce tvořící uzavřené smyčky, ani žádné masivní železné předměty.

Počet a parametry filtrů jsou navrženy tak, aby splňovaly podmínky stanovené dodavatelem elektrické energie (dříve JME a.s., nyní E.ON Distribuce a.s.) na přípustné příspěvky ke stanoveným harmonickým napětím v přípojném bodě a na velikosti impedance TNS na kmitočtech HDO ($f_{HDO} = 216 \text{ 2/3 Hz}$).

Dekompenzační tlumivka – je navržena vzduchová tlumivka bez odboček, v provedení pro venkovní prostředí, krytí IP00. Vinutí tlumivky je hliníkové. Je postavena na venkovních izolátorových podpěrkách pro nejvyšší napětí 38,5 kV, které jsou součástí dodávky. Ochranný prostor je vymezen stejně jako u tlumivek pro 3. a 5. harmonickou.

Snižovací transformátor – je navržen jednofázový. Chlazení transformátoru je přirozené vzduchové, nebo olejové s vybudovanou jímkou pro zachycení 100% oleje při havárii. Vinutí transformátoru je měděné. Je opatřen podvozkem s koly bez nákolků. Na svém sekundárním vinutí má připojenou:

- vzduchovou dekompenzační tlumivku,
- fázový regulátor COMPACT, jehož řídicí úhel je odvozen z údajů přístrojových transformátorů napětí a proudu tak, aby TNS ve svém připojovacím bodě k síti 110 kV vykazovala účinník v hodnotě cca $DPF = 0,95 - 0,98_{ind}$.

Regulátor jalového výkonu – ve funkci regulátoru jalového výkonu je navržen jednofázový tyristorový spínač typu COMPACT. Chlazení je vzduchové (nucené, ventilátorem), krytí IP40 pro prostředí normální podle ČSN 33 2000-3.

Regulační člen spínače je digitální, programovatelný. Vstupy regulačního členu jsou z přístrojových transformátorů proudu a napětí. Aby do celkové bilance jalových výkonů byl zahrnut i příkon naprázdno trakčního transformátoru, je proud snímán z PTP na straně 110 kV trakčních transformátorů.

Kondenzátorová baterie – kondenzátorové baterie filtrů 3. a 5. harmonické jsou sestavené ze stejných kondenzátorových jednotek bez možnosti měnit jejich kapacitu.

Baterie kondenzátorů filtru 3. harmonické – je v TNS Břeclav sestavena z 12 kusů stejných kondenzátorových jednotek na jmenovité napětí 20 kV, řazených po dvou do šesti (TNS Břeclav) paralelních větví. Jmenovité napětí kondenzátorové baterie je pak 40 kV.

Baterie kondenzátorů filtru 5. harmonické – je sestavena ze 4 kusů stejných kondenzátorových jednotek na jmenovité napětí 20 kV, řazených po dvou do dvou paralelních větví. Jmenovité napětí kondenzátorové baterie je pak 40 kV.

Tolerance kapacity je $\pm 3\%$. V každé kondenzátorové jednotce je zabudován vybíjecí odpor, který zajistí vybití kondenzátoru za 600 s.

Součástí dodávky každé kondenzátorové baterie je:

- PTP pro balanční ochranu baterie, je zapojen v diagonále baterie a snímá proud vyvolaný vznikem nesymetrie v baterii (např. změna kapacity kondenzátorové jednotky nebo průraz dielektrika jednoho kondenzátoru),
- relé indikující proud vyvolaný vznikem nesymetrie v baterii (balanční ochrana),
- ocelová nosná konstrukce pro kondenzátorové jednotky včetně podpěrných izolátorů pro venkovní prostředí. Kondenzátorové baterie se instalují ve venkovním prostředí.

5. Stanovení vlastních rezonančních frekvencí napájecí soustavy jako celku

5.1 Odvození obecného výrazu pro výpočet vlastních rezonančních frekvencí [1], [4]

Trakční obvod je tvořen trakčním transformátorem a připojeným trakčním vedením s charakterem vedení elektricky dlouhého, na opačném konci otevřeného. Impedance napájecí sítě 110 kV se pro velký zkratový výkon neuvažuje. Jedná se tedy o L-C obvod, pro jehož vlastní frekvenci $n_R = f_R / 50$ platí v principu Thomsonův vztah:

$$n_R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \sqrt{L \cdot C}}. \quad (5.1)$$

V daném případě platí:

$$L = L_{TT} = \frac{X_{TT,1}}{2 \cdot \pi \cdot f}. \quad (5.2)$$

Pro náhradní kapacitu C otevřeného dlouhého vedení platí:

$$Z_{TV,1} = -j \cdot Z_{TV,V} \cdot \cot g(\alpha_{TV,1} \cdot l_{TV} \cdot n_R) = -j \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot n_R \cdot C_{TV}}. \quad (5.3)$$

Po úpravě:

$$C = C_{TV} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot n_R \cdot Z_{TV,V} \cdot \cot g(\alpha_{TV,1} \cdot l_{TV} \cdot n_R)}. \quad (5.4)$$

Po dosazení do (5.1) dostaneme:

$$n_R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \sqrt{\frac{X_{TT,1}}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot n_R \cdot Z_{TV,V} \cdot \cot g(\alpha_{TV,1} \cdot l_{TV} \cdot n_R)}}}. \quad (5.5)$$

Po úpravách získáme výraz:

$$X_{TT,1} \cdot n_R = Z_{TV,V} \cdot \cot g(\alpha_{TV,1} \cdot l_{TV} \cdot n_R), \quad (5.6)$$

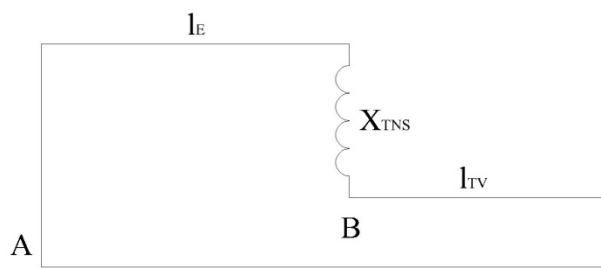
kde

$X_{TT,1} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{TT}$	reaktance trakčního transformátoru [Ω],
$Z_{TV,V} = \sqrt{\frac{L_{TV}}{C_{TV}}}$	vlnový odpor TV [Ω],
$\alpha_{TV,1} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \sqrt{L_{TV} \cdot C_{TV}}$	konstanta šíření TV [rad/km],
L_{TV}, C_{TV}	měrné parametry TV [H/km, F/km].

Výsledný výraz (5.6) odpovídá výrazu (3.24) uvedenému v této diplomové práci.

5.2 Stanovení rezonančních frekvencí s odpojeným FKZ pro zvolenou rozvinutou délku TV

Při výpočtu vlastních rezonančních frekvencí trakční napájecí soustavy s odpojeným FKZ vycházíme z principiálního schématu na *obr.5.1*.



Obr.5.1 Principiální schéma napájecí soustavy jednokolejné trati při napájení „L“

Obr.5.1 znázorňuje napájecí soustavu jednokolejné trati při napájení „L“. V bodě „A“ je rozvodna dodavatele elektrické energie napájející vedením 110 kV trakční napájecí stanicí. Prvek „ X_{TNS} “ představuje reaktanci trakčního transformátoru.

Odvozený výraz (5.6) se vztahuje k bodu „B“ *obr.5.1*, kde je z jedné strany připojeno TV, z druhé strany pak reaktance trakčního transformátoru v sérii s vedením 110 kV, přičemž obě tato vedení jsou považována za bezetrátová vedení homogenní („elektricky dlouhá“). Pro vlastní rezonanční frekvenci celé napájecí soustavy tak vzniká paralelní L-C rezonanční obvod, vykazující v bodě „B“ neomezenou vstupní impedanci.

Vstupní hodnoty pro následující výpočet byly převzaty z TNS Břeclav, jejíž technické řešení FKZ je obsahem kapitoly 4.4 této diplomové práce.

Výchozí hodnoty:

- náhradní indukčnost trakčního transformátoru přepočtená na jeho sekundární stranu je dána výrazem (2.1), $L_{TT} = 23,28 \text{ mH}$,
- dále je třeba znát hodnotu reaktance trakčního transformátoru pro základní harmonickou 50 Hz, kde je možné použít výraz (3.23), $X_{TT} = 7,31 \Omega$,
- vlnový odpor lze spočítat pomocí měrné indukčnosti a měrné kapacity, výraz (2.2) $Z_{TV} = 230,9 \Omega$,
- konstanta šíření vztažená na základní harmonickou 50 Hz vychází z výrazu uvedeného v kapitole 5.1, $\alpha_{TV,1} = 1,09 \cdot 10^{-3} \text{ rad/km}$.

Dosažením výše uvedených hodnot do rovnice (5.6) získáme neznámou n_R , která se vyskytuje na obou stranách rovnice. Tato neznámá představuje reálnou veličinu, pomocí níž lze vyjádřit hodnoty první vlastní frekvence napájecí soustavy dané konfigurace, viz. výraz (3.19).

Tab. 5.1 Výsledné první vlastní rezonanční frekvence pro různé délky trakčního vedení

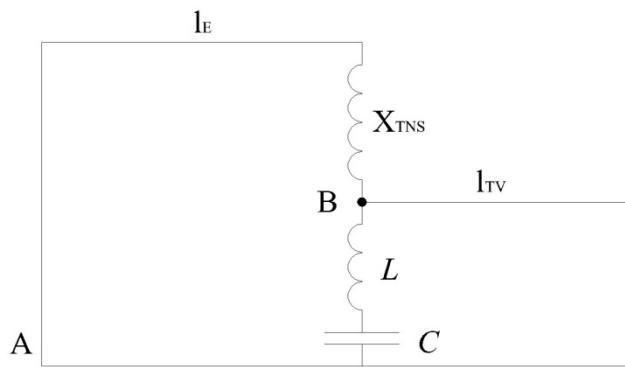
$l \text{ [km]}$	n_R	$f_R \text{ [Hz]}$
10	50,93	2546,5
20	34,21	1710,5
30	26,62	1330,5

V druhém sloupci tab.5.1 jsou uvedeny hodnoty reálných veličin získané řešením rovnice (5.6). Z tabulky je zřejmá nepřímá úměra mezi délkou napájeného trakčního vedení a reálnou veličinou n_R , resp. vlastní rezonanční frekvencí f_R .

Stejným postupem bychom odvodili hodnoty druhé a další vlastní rezonanční frekvence. Existence těchto frekvencí se však v provozu nijak výrazně neprojevuje.

5.3 Stanovení rezonančních frekvencí s připojeným FKZ pro zvolenou rozvinutou délku TV

Tak jako v předchozím případě z kapitoly 5.2 vycházíme při výpočtu první vlastní rezonanční frekvence napájecí soustavy z principiálního schématu *obr.5.2*. Rozdíl je v připojeném FKZ, přesněji připojení jedné větve FKZ, v našem případě filtru 3. harmonické.



Obr.5.2 Principiální schéma napájecí soustavy jednokolejné trati při napájení „L“ s připojenou jednou větví FKZ

Obr.5.2 znázorňuje napájecí soustavu jednokolejné trati při napájení „L“, kde na vývodu TNS je připojena jedna větev FKZ. V bodě „A“ je rozvodna dodavatele elektrické energie napájející vedením 110 kV trakční napájecí stanici. Prvek „ X_{TNS} “ představuje reaktanci trakčního transformátoru.

Pro výpočet vlastní frekvence trakční napájecí soustavy s použitím jedné L-C větve FKZ lze vyjít ze vztahu (5.6). Tento vztah je ve jmenovateli na pravé straně rovnice rozšířen o člen představující větev 3. harmonické FKZ dle *obr.5.2*.

$$X_{TT,1} \cdot n_R = \frac{Z_{TV,V}}{\operatorname{tg}(\alpha_{TV,1} \cdot l_{TV} \cdot n_R) + \frac{100 \cdot \pi \cdot C_K \cdot Z_{TV,V}}{1 - \left(\frac{n_R}{n_{LC}}\right)^2} \cdot n_R}, \quad (5.7)$$

kde

C_K je kapacita kompenzačního kondenzátoru L-C větve,
 n_{LC} představuje ladění L-C větve na frekvenci $f_{LC} = 50 \cdot n_{LC}$.

Výraz (5.7) se vztahuje k bodu „B“ *obr.5.2*, kde je z jedné strany připojeno TV, paralelně k němu jedna větev FKZ, z druhé strany pak reaktance trakčního transformátoru v sérii

s vedením 110 kV, přičemž obě tato vedení jsou považována za bezztrátová vedení homogenní („elektricky dlouhá“). Pro vlastní rezonanční frekvenci celé napájecí soustavy tak vzniká paralelní L-C rezonanční obvod, vykazující v bodě „B“ neomezenou vstupní impedanci.

Navážeme-li na číselné hodnoty z kapitoly 5.2, je nutné doplnit hodnoty těchto veličin:

- kapacita kompenzačního kondenzátoru L-C větve FKZ pro filtr 3. harmonické, $C_K = 13,81 \mu\text{F}$,
- naladění L-C větve na $f_{LC} = 147,5 \text{ Hz} \Rightarrow n_{LC} = 2,95$.

Důvod „neostrého“ ladění filtru 3. harmonické je blíže vysvětleno v kapitole 4.3.1 této diplomové práce.

Dosažením hodnot uvedených v kapitolách 5.2 a 5.3 do rovnice (5.7) získáme neznámou n_R , která se vyskytuje na obou stranách rovnice. Tato neznámá představuje reálnou veličinu, pomocí níž lze vyjádřit vlastní frekvence napájecí soustavy dané konfigurace, výraz (3.19).

Tab. 5.2 Výsledné první vlastní rezonanční frekvence pro různé délky trakčního vedení s připojenou jednou větví FKZ

$l \text{ [km]}$	n_R	$f_R \text{ [Hz]}$
10	56,71	2835,5
20	37,63	1881,5
30	29	1450

V druhém sloupci *tab.5.1* jsou uvedeny hodnoty reálných veličin získané řešením rovnice (5.7). Stejně jako v zapojení bez FKZ (kapitola 5.2) je z tabulky zřejmá nepřímá úměra mezi délkou napájeného trakčního vedení a reálnou veličinou n_R , resp. první vlastní rezonanční frekvencí f_R .

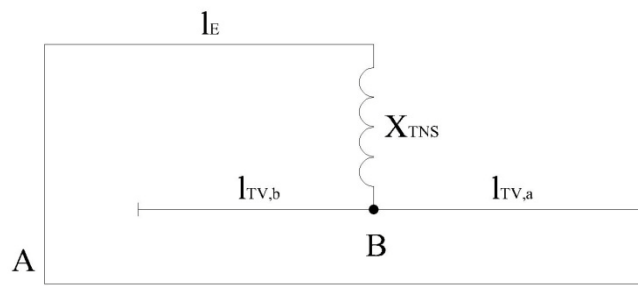
Nutno dodat, že konfigurace trakční napájecí soustavy vykazuje neomezený počet rezonančních frekvencí, což plyne z průběhu funkce *cotg*. Dalším důležitým poznatkem je skutečnost, že po sobě jdoucí rezonanční frekvence nejsou násobky jak základní harmonické 50 Hz, tak nemají celočíselnou vazbu mezi sebou, např. pro délku TV 10 km je hodnota první rezonanční frekvence rovna 2546,5 Hz, druhá hodnota je rovna 14895,5 Hz. Uvedené značí, že druhá rezonanční frekvence není dělitelná hodnotou první rezonanční frekvence a ani jedna z nich není dělitelná základní frekvencí 50 Hz.

5.3.2 Výrazy pro výpočet rezonanční frekvence dalších konfigurací napájecí soustavy

V oddílech 5.2 a 5.3 jsou stanoveny vlastní rezonanční frekvence napájecí soustavy jednokolejné trati při napájení do „L“ s odpojeným FKZ a připojeným FKZ, resp. větve filtru 3. harmonické.

V následujícím textu je přehled principiálních schémat a příslušných obecných vztahů pro další možné konfigurace napájecí soustavy bez uvažování přírodního vedení 110 kV.

a) Napájecí soustava při napájení do „T“ – jednostranné napájení dvou úseků téže koleje jednokolejné trati z jednoho trakčního transformátoru.



Obr.5.3 Principiální schéma napájecí soustavy jednokolejné trati při napájení „T“

Pro tuto konfigurace je pro další nutno rozlišovat dva stavy:

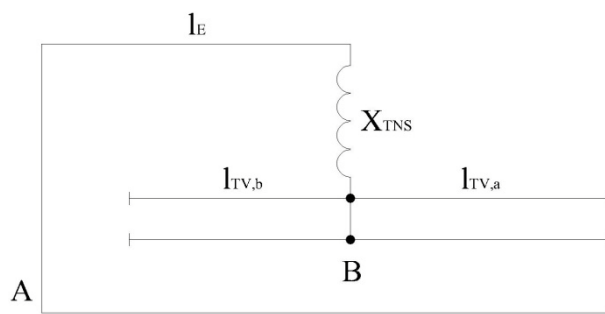
- délky obou úseků trakčního vedení téže koleje značené $l_{TV,a}$ a $l_{TV,b}$ jsou rozdílné, potom vztah pro rezonanční frekvenci:

$$X_{TT,1} \cdot n_R = \frac{Z_{TV,V}}{tg(\alpha_{TV,1} \cdot l_{TV,a} \cdot n_R) + tg(\alpha_{TV,1} \cdot l_{TV,b} \cdot n_R)}, \quad (5.8)$$

- délky obou úseků jsou stejné, trakční napájecí stanice leží uprostřed celkové délky napájeného trakčního vedení značené $l_{TV,celk}$:

$$X_{TT,1} \cdot n_R = \frac{Z_{TV,V}}{2} \cdot \cot g \left(\alpha_{TV,1} \cdot \frac{l_{TV,celk}}{2} \cdot n_R \right). \quad (5.9)$$

b) Napájecí soustava při napájení do „T“ – jednostranné napájení čtyř úseků dvoukolejné trati z jednoho trakčního transformátoru.

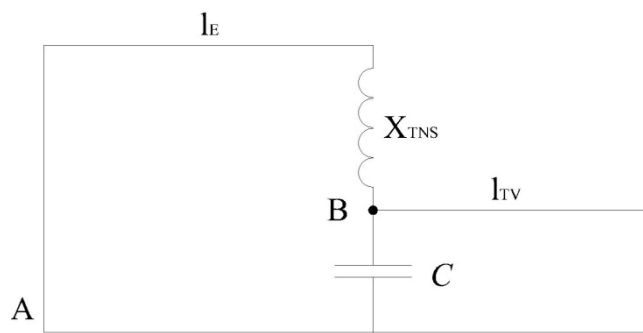


Obr.5.4 Principiální schéma napájecí soustavy dvoukolejné trati při napájení „T“

Pro schéma z obr.5.4 platí vztah:

$$X_{TT,1} \cdot n_R = \frac{Z_{TV,V}}{2 \cdot \left[\operatorname{tg}(\alpha_{TV,1} \cdot l_{TV,a} \cdot n_R) + \operatorname{tg}(\alpha_{TV,1} \cdot l_{TV,b} \cdot n_R) \right]}. \quad (5.10)$$

c) Napájecí soustava při napájení do „L“ – jednostranné napájení jednoho úseku jednokolejné trati z jednoho trakčního transformátoru připojeným kompenzačním kondenzátorem



Obr.5.5 Principiální schéma napájecí soustavy jednokolejné trati při napájení „L“, na vývodu z TNS je připojen kompenzační kondenzátor C

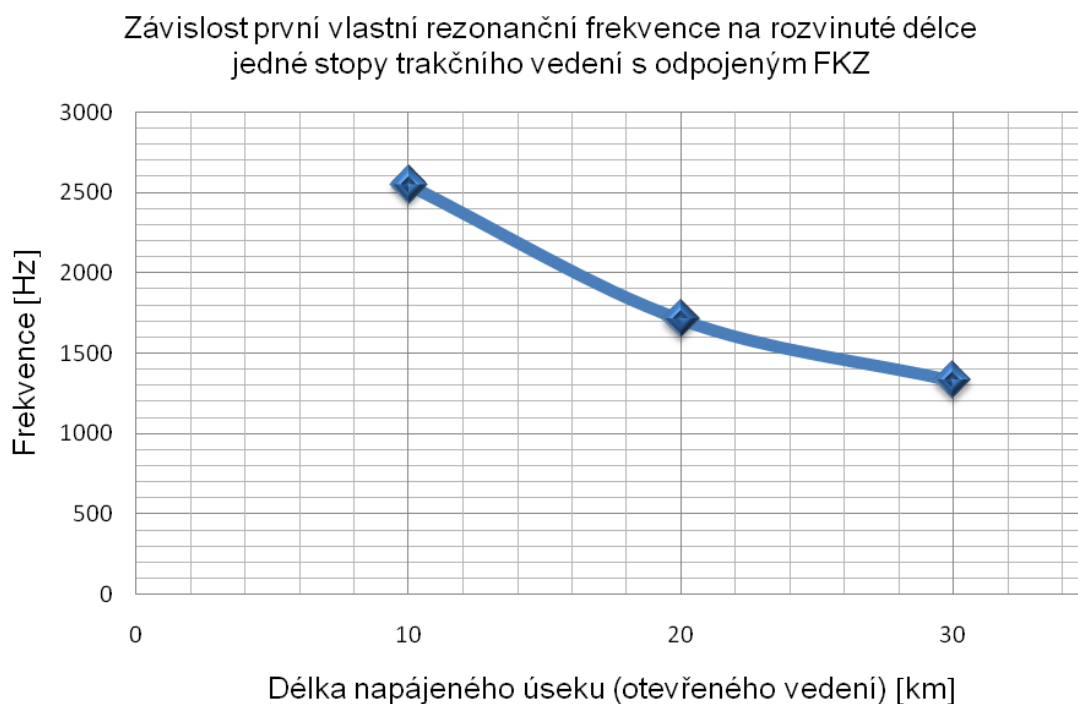
Pro schéma z obr.5.5 platí vztah:

$$X_{TT,1} \cdot n_R = \frac{Z_{TV,V}}{\operatorname{tg}(\alpha_{TV,1} \cdot l_{TV} \cdot n_R) + 100 \cdot \pi \cdot C_K \cdot Z_{TV,V} \cdot n_R}. \quad (5.11)$$

5.4 Diagram závislosti první vlastní rezonanční frekvence na rozvinuté délce jedné stopy trakčního vedení

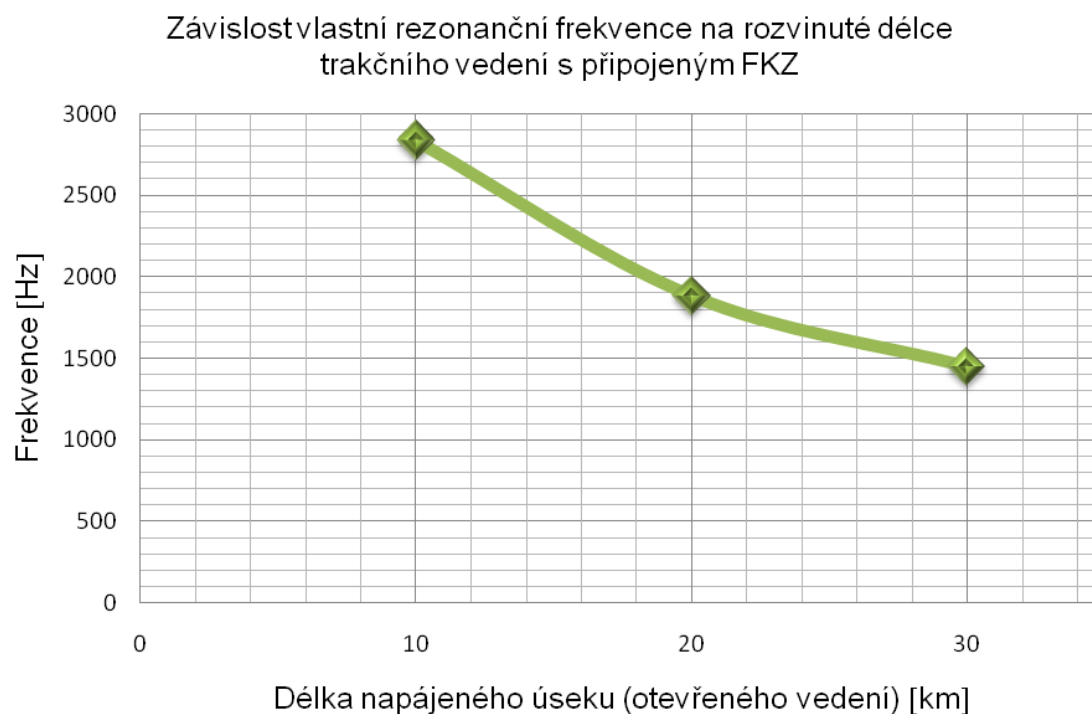
Stanovením číselných hodnot prvních vlastních frekvencí, dané konfigurace sítě v kapitole 5.2 a 5.3, je možné sestavit diagramy závislosti těchto frekvencí na délce napájeného úseku.

a) Zapojení „L“ s odpojeným FKZ – na obr.5.6 je diagram závislosti první rezonanční frekvence trakční napájecí soustavy na rozvinuté délce jedné stopy trakčního vedení s odpojeným FKZ. Zde je nutno upozornit na konfiguraci napájecí soustavy, pro niž uvedený diagram platí. Jedná se o trakční napájecí stanici provozující jeden trakční transformátor připojený do rozvodny dodavatele elektrické energie s neomezeným zkratovým výkonem. Dále platí, že trakční transformátor napájí jeden úsek jednokolejné trati, tzv. napájení do „L“.



Obr.5.6 Diagram první vlastní rezonanční frekvence v závislosti na délce napájeného úseku bez FKZ

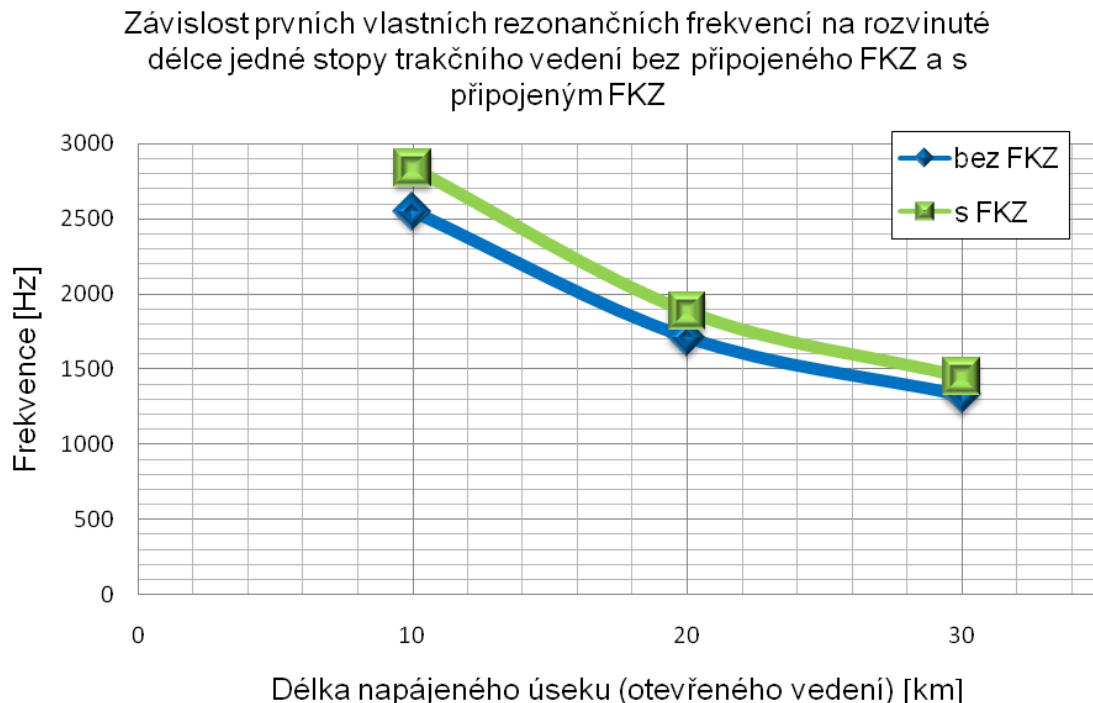
b) Zapojení „L“ s připojeným FKZ – na obr.5.7 je diagram závislosti první rezonanční frekvence trakční napájecí soustavy na rozvinuté délce jedné stopy trakčního vedení s připojeným FKZ. Konfigurace napájecí soustavy je stejná jako v předcházejícím případě. Zásadní rozdíl je v připojeném FKZ, přesněji v připojení filtru 3. harmonické. Tato větev tvoří L-C obvod, tzn. tlumivka v sérii s baterií kondenzátorů.



Obr.5.7 Diagram první vlastní rezonanční frekvence v závislosti na délce napájeného úseku s FKZ

Na první pohled je už vidět rozdíl v číselných hodnotách prvních vlastních frekvencí dané konfigurace trakčního obvodu mezi variantou s připojeným FKZ a odpojeným FKZ. Další zajímavé skutečnosti jsou patrné z následujícího grafu, *obr.5.8*.

c) Zapojení „L“ s odpojeným FKZ a připojeným FKZ – obr.5.8 znázorňuje obě výše uvedené varianty.



Obr.5.8 Diagram vlastních rezonančních frekvencí v závislosti na délce napájeného prvních úseku s odpojeným FKZ a s připojeným FKZ

Z grafu je patrné, že:

- připojením FKZ k trakční napájecí soustavě první rezonanční frekvence při napájení úseku 10 km vzroste přibližně o 290 Hz, což je příznivější stav, než kdyby byl připojen místo L-C větve pouze kondenzátor,
- prodlužujeme-li geometrickou délku napájeného úseku, rozdíl prvních rezonančních frekvencí se snižuje.

Z druhého poznatku lze předpokládat jistou nepřímou úměru, a to takovou, že s rostoucí délkou trakčního vedení se bude snižovat rozdíl prvních vlastních frekvencí. Teoreticky bude konci nekonečně dlouhého vedení příslušet nekonečně malý rozdíl vlastních rezonančních frekvencí. Z praktického hlediska jsou ale důležité úseky do maximální délky 30 km, což je přibližná vzdálenost spínací stanice a trakční napájecí stanice. Ve výjimečných případech může být, např. z důvodu výluky sousední napájecí stanice, napájený úsek prodloužen na 60 km.

6. Závěr

Trakční napájecí soustava jako celek vykazuje neomezený počet vlastních rezonančních frekvencí, jejichž číselná hodnota závisí na dané konfiguraci. Rezonanční frekvence je buzena hnacím vozidlem, jakožto generátorem proudových harmonických.

Geometrická délka napájeného úseku, elektrické parametry trakčního vedení a napájecího transformátoru určují frekvenci, na které dochází k rezonanci. Poloha vozidla na napájeném úseku, z důvodu velké vnitřní impedance, neovlivní hodnotu rezonanční frekvence. S rostoucí délkou napájeného úseku klesá kmitočet rezonance.

Vlivem budícího účinku EHV dojde v napájecí soustavě ke vzniku stojaté vlny rezonanční frekvence. Napěťová složka rezonanční frekvence v místě vzniklé kmitny způsobuje zvýšenou deformaci časového průběhu trakčního napětí na otevřeném konci trakčního vedení. Míra této deformace je nepřímo úměrná vzdálenosti EHV od trakční napájecí stanice. Protože činný odběr EHV způsobí útlum stojaté vlny, je míra deformace závislá i na této veličině. Ve schématu do „L“ je závažný průchod proudové vlny s rezonanční frekvencí trakční napájecí stanicí. V trakční napájecí stanici a následně v síti dodavatele elektrické energie 110 kV vznikne kmitna proudové složky rezonanční frekvence. Tato skutečnost má pak za následek nežádoucí zvětšení napěťové složky rezonanční frekvence v místě připojení trakční napájecí stanice k síti 110 kV.

Tato diplomová práce se v teoretické části pokusila objasnit vznik a důsledky vlastních rezonančních frekvencí napájecí soustavy. Prokazuje, že se EHV chová jako zdroj proudových harmonických, tzn. má velkou vnitřní impedanci. Dále je zde objasněna funkce a důvod instalace filtračně-kompenzačního zařízení a je uveden příklad dnes běžně provozované koncepce FKZ na ČD.

V praktické části je postup výpočtu číselných hodnot vlastních frekvencí pro konkrétní konfiguraci napájecí soustavy. Hodnoty jsou stanoveny pro tři různé délky napájených úseků s odpojeným a připojeným FKZ.

Seznam použité literatury

- [1] HLAVA, Karel. Elektromagnetická kompatibilita (EMC) drážních zařízení, 1. vyd. Pardubice: Univerzita Pardubice, březen 2004. ISBN 80-7194-637-0
- [2] KŮS, Václav. Vliv polovodičových měničů na napájecí soustavu, 1. vyd. Praha: Nakladatelství BEN – technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-062-8
- [3] HLAVA, Karel. Kmitočtová závislost elektrických parametrů trakčního vedení. In *Sborník prací výzkumného ústavu železničního, číslo 1*, 1. vyd. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1974.
- [4] HLAVA, Karel. Proudová rezonance v trakčním obvodu jednofázové soustavy 25 kV 50 Hz. In *Sborník prací výzkumného ústavu železničního, číslo 4*, 1. vyd. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1975.
- [5] FEJT, Jiří. – RYDLO, Jiří. Střídavá trakce, 1. vyd. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1969.
- [6] TRNKA, Zdeněk. Theoretická elektrotechnika I. 3. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, n. p., prosinec 1956.
- [7] JANSÁ, František. Vozidla elektrické trakce, 1. vyd. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1983.
- [8] MARTAN, František. Fourierovy řady, 1. vyd. Praha: České vysoké učení v Praze, únor 1974. 402-1707
- [9] Technická zpráva PS 01-09-04, TNS Břeclav, Filtračně-kompenzační zařízení
- [10] <http://www.atlaslokomotiv.cz> 18.10.2008